

INTER-AMERICAN TROPICAL TUNA COMMISSION COMISION INTERAMERICANA DEL ATUN TROPICAL

Bulletin — Boletín

Vol. II, No. 4



**PRIMARY PRODUCTION, CHLOROPHYLL, AND ZOOPLANKTON
VOLUMES IN THE TROPICAL EASTERN
PACIFIC OCEAN**

**PRODUCCION PRIMARIA, CLOROFILA, Y VOLUMENES DEL
ZOOPLANKTON EN LA ZONA TROPICAL DEL
OCEANO PACIFICO ORIENTAL**

by — por

ROBERT W. HOLMES, MILNER B. SCHAEFER, and—y BELL M. SHIMADA

La Jolla, California
1957

INTER-AMERICAN TROPICAL TUNA COMMISSION

COMISION INTERAMERICANA DEL ATUN TROPICAL

Bulletin — Boletín

Vol. II, No. 4

**PRIMARY PRODUCTION, CHLOROPHYLL, AND ZOOPLANKTON
VOLUMES IN THE TROPICAL EASTERN
PACIFIC OCEAN**

**PRODUCCION PRIMARIA, CLOROFILA, Y VOLUMENES DEL
ZOOPLANKTON EN LA ZONA TROPICAL DEL
OCEANO PACIFICO ORIENTAL**

by — por

ROBERT W. HOLMES, MILNER B. SCHAEFER, and—y BELL M. SHIMADA

La Jolla, California
1957

CONTENTS — INDICE

ENGLISH VERSION — VERSION EN INGLES

	Page
Methods of measurement of chlorophyll, primary production, and standing crop of zooplankton.....	129
Chlorophyll "a".....	129
Primary production.....	130
Zooplankton standing crop.....	132
Results of <i>in situ</i> measurements in relation to oceanographic features..	133
Surface observations.....	133
Sub-surface observations.....	134
Correlation of surface primary production and zooplankton volumes with surface chlorophyll.....	135
Carbon fourteen uptake of samples incubated on shipboard.....	137
Time variation in zooplankton volumes.....	138
Comparisons with observations in other oceanic regions.....	138

FIGURES — ILUSTRACIONES.....	140
TABLES — TABLAS.....	150

SPANISH VERSION — VERSION EN ESPAÑOL

	Página
Métodos para la determinación de la clorofila, de la producción primaria y de la cantidad de zooplancton.....	158
Clorofila "a".....	158
Producción primaria.....	158
Cantidad de zooplancton.....	160
Resultados de las mediciones <i>in situ</i> en relación con las características oceanográficas.....	161
Observaciones de la superficie.....	161
Observaciones en aguas subsuperficiales.....	162
Correlación entre la producción primaria y los volúmenes del zooplancton con la clorofila de aguas superficiales.....	164
Asimilación de carbón catorce en muestras incubados a bordo.....	166
Variación en el tiempo en los volúmenes del zooplancton.....	167
Comparaciones con observaciones en otras regiones oceánicas.....	167

LITERATURE CITED — BIBLIOGRAFIA CITADA.....	169
---	-----

PRIMARY PRODUCTION, CHLOROPHYLL, AND ZOOPLANKTON VOLUMES IN THE TROPICAL EASTERN PACIFIC OCEAN¹

by

Robert W. Holmes², Milner B. Schaefer^{2,3}, and Bell M. Shimada³

Between 1 October and 17 December 1955 investigations of the physical, chemical and biological oceanography of the Eastern Pacific Ocean in a region bounded approximately by 30° N. latitude, 9° S. latitude, 120° W. longitude and the mainland coast were conducted from the vessels *Horizon* and *Spencer F. Baird* of the Scripps Institution of Oceanography of the University of California. These were part of a cooperative operation, designated for convenience by the code name "Eastropic," in which a vessel of the U. S. Fish and Wildlife Service worked, during this same period, further west and a vessel of the Peruvian Navy worked further south, offshore from Peru. A vessel of the California State Fisheries Laboratory also conducted certain sub-surface tuna fishing operations and other studies in the same general region as the Scripps vessels.

In addition to carrying out a number of special studies related to particular oceanographic features, the Scripps vessels occupied a considerable number of hydrographic stations. The locations of these stations, at each of which were made net-hauls for zooplankton, are shown in Figure 4 and Tables 2 and 3. At some of the hydrographic stations, and in some places between stations, there were made from the *Spencer F. Baird* measurements of chlorophyll "a" and of primary production (by the C¹⁴ technique), both *in situ* and in a shipboard incubator. The purpose of this paper is to report on the results of these biological observations.

The authors wish to express their gratitude to Drs. Francis T. Haxo and William H. Thomas, and to Mr. Elmer Squier for advice and for help in building the shipboard incubator.

METHODS OF MEASUREMENT OF CHLOROPHYLL, PRIMARY PRODUCTION AND STANDING CROP OF ZOOPLANKTON

Chlorophyll "a"

Surface water samples for the determination of chlorophyll were collected with a plastic bucket both at hydrographic stations and while the vessel was underway. At stations, a lucite Van Dorn (1956) sampler was

¹Contribution from the Scripps Institution of Oceanography, New Series No. 942. This paper represents, in part, results of research carried out by the University of California under contract with the Office of Naval Research.

²Scripps Institution of Oceanography.

³Inter-American Tropical Tuna Commission.

employed for the collection of sub-surface samples. The water sample (8.3 liters, or in some rich areas 4.1 l.) was filtered through either one or two 47-mm. type-HA Millipore filters after the addition of a small amount of magnesium carbonate to the water sample. The chlorophyll was extracted from each filter pad with 3 mls. of 90% acetone (reagent grade) in the cold (*ca.* 10° C.) and dark for approximately 10 hours. The extract from each sample was then centrifuged until clear and decanted into a 10-ml. volumetric flask. The remaining precipitate in the centrifuge tube was re-suspended in 3 mls. of 90% acetone, centrifuged, and the supernatant liquid combined with that obtained previously. The extract was then diluted to 10 mls. and its optical density measured in a 10 cm. semi-micro absorption cell at 750, 665, 645 and 635/ $m\mu$ with a Beckman model DU spectrophotometer. Turbidity corrections were made on the basis of the transmission at 750/ $m\mu$ and the concentrations of chlorophyll "a" were calculated from the equation given by Richards with Thompson (1952), and are shown in Table 1.

Primary production

In this study, the C^{14} method was employed to determine the rate of carbon fixation by the phytoplankton. Following the precedent set by Ryther (1956b), we have considered the rate of C^{14} uptake to be synonymous with the term "primary production."

The C^{14} was prepared in the manner described by Steeman-Nielsen (1952) with the exception that glass-redistilled water instead of artificial sea water was used as the solvent for the $Na_2C^{14}O_3$. Two solutions were prepared: one containing approximately 100/ μ C/ml. (which was employed from Stations 1 through 41), the other, 20/ μ C/ml. (employed from Stations 45 through 57). One-ml. aliquots of these solutions were placed in one-ml. ampules, which were immediately sealed and autoclaved. The standardization technique was similar to that employed by Steeman-Nielsen (1952) with the exception that Millipore filters were employed instead of collodion filters.

The *in situ* studies were carried out in the following manner: A sample was collected at each desired depth with the lucite Van Dorn sampler shortly before daylight. The samples were transferred to 250 ml. Pyrex bottles. The C^{14} solution was carefully transferred from the ampule to the water sample with a hypodermic syringe and needle, each ampule being rinsed three times with water from the sample. The samples were re-suspended at dawn, at approximately the depth at which they were collected, on a weighted rope supported by a free-floating glass buoy, 14 inches in diameter, enclosed in cord netting and attached to a bamboo pole bearing a flag at its top, for ease in visual location. The "surface" sample was attached to the side of the buoy, just under the water surface, by tying the bottle to the netting in which the glass ball was enclosed. The incubation

period was terminated at local noon. Immediately after the incubation, the samples were filtered through 47-mm. type-HA (plain) Millipore filters. The filter pads were dried, fumed over concentrated HCl for 20 minutes, and re-dried with silica-gel before counting. Filter pad activity was measured using an ANTON 1001-T tube with a Nuclear-Chicago scalar (Mod. 182A).

The values for primary production (Table 1) were calculated from filter pad activity in the manner described by Steeman-Nielsen (1952). These data have not been corrected for any losses of carbon that would occur during the hours of darkness. Primary production in the *water column* ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$) was estimated by integration, with a planimeter, of the smoothed depth profiles (Figs. 6 to 11) for each station.

The samples placed in the shipboard incubator were collected and inoculated with C^{14} in the same manner as the samples utilized in the *in situ* studies. The temperature in the incubator was maintained within 1°C . of the sea surface temperature observed when the samples were collected. The light intensity to which the samples were exposed during a given 4-hour experiment was very nearly constant. At the beginning of the expedition the light intensity incident to the bottom of the reaction vessels was about 1100 foot candles; the light intensity decreased slowly as the daylight-type fluorescent lamps aged and as the reflector behind the lamps became tarnished. As a result, the last samples placed in the incubator received only 600 foot candles of incident illumination. In order to make the results of the different experiments comparable, we have reported the rate of carbon uptake in $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{hr}$. at 1000 foot candles. 1000 foot candles was selected as a high light intensity believed to be below that which would cause saturation and yet still be on the linear portion of the curve relating photosynthesis to light intensity. The average intensity to which the plant population was subjected would be somewhat less than 1000 foot candles, because of the fall-off in intensity toward the neck of the bottle.

Where vertical series of observations were not made, primary surface *in situ* production was measured using samples dipped from the sea surface with a plastic bucket at or near sunrise. Samples were placed in Pyrex bottles, inoculated with C^{14} , and trailed astern of the vessel, just under the surface, until local noon. The subsequent treatment of the samples was identical with that described above for *in situ* vertical series. Results are reported as $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{day}$ in Table 1.

Samples collected for the measurement of primary production were seldom duplicated and no comprehensive study of variability due to sampling was attempted. However, at six stations (Nos. 6, 13, 19, 32-10, 45, and 55) two samples were collected from the same bucket of surface water and their C^{14} -uptakes measured after shipboard incubation. Two samples from the same bucket were also taken at Station 1 and these were incubated in

bottles trailing astern of the vessel. In four out of the seven cases the duplicates agreed with one another to within $\pm 10\%$, in one case they agreed to within $\pm 20\%$, and in the remaining two cases agreement was poor ($\pm 100\%$). The values given in Table 1 and used throughout this paper represent the averages of the duplicates at these stations.

The reason for this variability is not understood. We have encountered similar variations in other areas, and Dr. W. H. Thomas of Scripps Institution of Oceanography in his studies off the Mississippi River Delta in the Gulf of Mexico has encountered similar variability (personal communication). It would seem that usually the C^{14} uptakes in duplicate samples agree well, but that occasionally disagreement between them is large; frequently the uptake of duplicate samples will disagree by a factor of two, three, or even four. These aberrancies may result from the experimental technique employed or may be due to real differences in the phytoplankton content of the two samples.

Zooplankton standing crop

Measurements were made of the standing crop of zooplankton by means of plankton net-hauls, using gear and techniques comparable to those presently employed by the California Cooperative Oceanic Fishery Investigations. At each station, an oblique tow was made with a one-meter (mouth diameter) plankton net made of 30XXX silk grit gauze in the body and 56XXX silk grit gauze in the rear section and cod-end bag. The net was lowered from the surface to a depth of approximately 300 meters (450 meters wire length) at a rate of 50 meter per minute while the vessel was slowly underway and retrieved at a rate of 20 meters per minute. The duration of a single haul, therefore, was about 32 minutes, on the average. An Atlas flow meter was mounted in the mouth of the net to record the volume of sea water filtered by the net. Flow meters were calibrated before and after the cruise. The details of all quantitative plankton hauls made from the vessels *Spencer F. Baird* and *Horizon* during Eastropic Expedition are given in Tables 2 and 3, respectively.

Zooplankton collections were preserved in 4 percent buffered formalin. Ashore, the collections were filtered and the total "wet" volumes of plankton obtained at each station were measured by displacement. The volume of water sampled by each haul was determined by a method described by the South Pacific Fishery Investigations of the U. S. Fish and Wildlife Service (1953) and the displacement volumes were then converted into terms of the volume of organisms, in cubic centimeters, collected from each 1000 cubic meters of sea water strained. The standardized values for each station are presented in the last 2 columns of Tables 2 and 3, first for the entire sample, and second, for the sample after removal of all organisms larger than 5 cubic centimeters volume.

RESULTS OF *IN SITU* MEASUREMENTS IN RELATION TO OCEANOGRAPHIC FEATURES

Surface observations

The values of surface chlorophyll "a," surface primary production *in situ*, and zooplankton volumes observed during the expedition are presented in Figures 2 to 4, while Figure 1 shows the current systems and water masses, based on a preliminary study of the hydrographic observations and current measurements made during the expedition.

In the water of the California Current and North Equatorial Current (Stations 1-10), well offshore from Baja California and Central Mexico, we find characteristically low concentrations of chlorophyll "a" (about 0.1 mg/m³), very low surface primary production (about 0.40 mgC/m³/day), and low zooplankton volumes (generally less than 50 cc/1000m³).

Higher values of chlorophyll, primary production, and zooplankton volumes were found in the region of the northern boundary of the Equatorial Counter Current, and these values trend upward from west to east toward the coast of Central America. This seems to be related to the thermocline, which is elevated close to the surface as a ridge along this boundary, and which shoals from west to east. At Station 31-11 (Fig. 2), for example, at about 115° W. longitude, the mixed layer has a thickness of about 30 meters, while at Station 33 at about 90° W. longitude, it was only 18 meters thick. At the inshore end, this ridge appears to spread out into a broad "dome" off the Central American coast, the thermocline becoming slightly deeper again close inshore (e. g. Stations 35 and 39 had a mixed layer of some 25-30 meters thickness). In the region of this "dome" off Central America we find relatively high values of surface chlorophyll (0.2 to 0.3mg/m³), surface primary production (about 25 mgC/m³/day), and zooplankton volumes (200 cc/1000 m³ and higher).

In the region of the northern boundary of the Peru Current, off northern South America and in the vicinity of the Galapagos Islands (Stations 50 to 59), we encounter high standing crops of phytoplankton (chlorophyll "a" up to 2.0 mg/m³), and zooplankton (up to 600 cc/1000 m³). The surface primary production at the two stations where measurements were made was also high, but not as high as off Central America. However, at Station 57 (Fig. 2), production in the water column as a whole exceeded the values obtained off Central America.

Quite high levels of chlorophyll "a," phytoplankton primary production, and zooplankton volumes were also observed in the South Equatorial Current (Stations 18 to 24) in the vicinity of the equator near 115° W. longitude. Hydrographic data from this and other cruises indicate the presence of upwelling along the equator (unpublished results).

High levels of chlorophyll and zooplankton volumes also appear in the sea areas just offshore from the coast of Mexico, from the Gulf of Tehuantepec to the vicinity of Cape Corrientes. Unfortunately, the supply of C^{14} had been used up by the time the expedition reached this area, so determinations of production were not possible.

Sub-surface observations

At seven stations observations of the chlorophyll "a" concentration and rate of primary production *in situ* were obtained at several depths down to 100 or 125 meters. These observations, together with the observed temperatures, salinity and oxygen concentrations are presented as functions of depth in Figures 5 to 11.

Stations 33, 35, 37, 39 located off Central America (Figs. 7 to 10) are generally similar as regards production and chlorophyll distributions, as well as physical characteristics. Stations 24 and 31-11 (Figs. 5 and 6) located in the far offshore waters of the Counter Current and South Equatorial Current are different with respect to both biological and physical properties.

The first group of stations is characterized by a well-defined, shallow, mixed layer within which most of the primary production occurs (90% or more, except at Station 35 where the ratio is about 67%). Gradients in chlorophyll "a" are small in the upper 40 meters, and an important fraction of the chlorophyll in the water column occurs below the thermocline and halocline. The maximum rate of primary production occurred at or very near the surface. Overcast conditions prevailed on the days on which these stations were occupied which presumably prevented light inhibition at the surface (see Steeman-Nielsen 1951 and 1952).

There also occurs at each of these stations (Figs. 7 to 10) an increase in the primary production just above the thermo and haloclines about which we can only speculate. It seems most improbable that the amount of photosynthetically active light could be greater at 10-20 meters than at some depth nearer the surface; thus it seems unlikely that light could be responsible for this increase. Similarly, the increase does not seem to be related to the quantity of chlorophyll "a" in the water, although it should be mentioned that the chlorophyll method employed does not distinguish between chlorophyll "a" and phaeophytin "a." If this observed increase is real, factors other than light and chlorophyll would seem to be responsible. Unfortunately, nutrient data are lacking at these stations. Such information might have been of value in explaining this apparent anomaly.

While the data from Stations 31-11 and 24 (Figs. 5 and 6) are not as complete nor as continuous as those off Central America, the few observations indicate a different type of situation. Here, an important fraction (about 50%) of total primary production is taking place below the mixed

layer, and the primary production is relatively high at 70 meters depths. Only at Station 21-11 is there good correspondence between chlorophyll concentration and the rate of production. It may be noted that at Station 24 (Fig. 6), which is located in the region of equatorial upwelling, there is very little salinity gradient down to 100 meters and the thermocline is not sharply developed.

At Station 57 (Fig. 11) near the northern boundary of the Peru Current, the thermocline and halocline are much less sharp than at stations off Central America. At this station, the chlorophyll remains high down to a depth of 70 meters, while the primary production drops off to a negligible amount well above this.

The region off Central America is also characterized by the presence of a pronounced oxygen minimum in the upper layers (Figs. 7 to 10). The most rapid decrease in oxygen concentration generally occurs immediately below the mixed layer. It is hypothesized that the water of low oxygen content originates here, as a result of the oxygen demand of the phytoplankton below the compensation depth, through respiration of the phytoplankton and/or the bacterial activity associated with dead and dying phytoplankton. A similar explanation for the oxygen minimum south of the equator off Peru is likewise suggested by the data from Station 57 (Fig. 11).

CORRELATION OF SURFACE PRIMARY PRODUCTION AND ZOOPLANKTON VOLUMES WITH SURFACE CHLOROPHYLL

If all the available primary production and chlorophyll "a" data obtained in surface water are considered together (Fig. 12), there appears to be some correlation between these two variables, but with a fairly large scatter. The data reveal that, on the average, low primary production is associated with low chlorophyll "a" and that high production is associated with high chlorophyll. The points for most of the stations appear to fall about a vague line, with the production increasing faster than chlorophyll "a". The stations off Central America, however, particularly Stations 33, 35 and 37, indicate a relatively higher production per unit of chlorophyll than is shown by the rest of the data.

Edmondson (1955), working with populations, resulting from the enrichment of Woods Hole Harbor water, grown in concrete tanks, found that the relationship between production (as measured with the oxygen light-and-dark-bottle technique) and chlorophyll could be improved by taking into consideration variations in incident radiation. In order to see if such a relationship existed for our data, since no direct measurements of incident radiation were made, we obtained the average incident flux of radiation (direct plus diffuse) for a cloudless sky from the curves of Kimball (1928) for December and applied Kimball's (1928) correction for the degree of cloud cover observed. The surface *in situ* production was then calcu-

lated in terms of carbon uptake per cubic meter per day per unit of incident radiation and replotted against the surface chlorophyll concentration at the same stations. The resulting relationship was quite similar to that shown in Figure 12, with about the same degree of scatter.

If the *in situ* data in Figure 12 are viewed taking into account the geographic position of the sampling locations, we see that they isolate themselves into 3 groups, which possess different production/chlorophyll relationships. The offshore stations north of approximately 7° N. latitude (Stations 1, 6, 13, 32-10, 31-11, and 27), which are located in the North Equatorial Current and Equatorial Counter Current fall into one group, while the inshore stations off Central America (Stations 33, 35, 37, and 39) fall into another group. A third group is composed of the stations in the Peru Current, off Ecuador and Peru, and one considerably west of the Galapagos Islands on the equator in the South Equatorial Current (Stations 25, 45, 57, and 51).

We are uncertain about the meaning of these relationships. A possible explanation is suggested by the recent work of Rodhe (personal communication) who found a relationship between production and chlorophyll at a single station in Lake Erken. When his daily observations were grouped into monthly periods, they revealed, with a single exception, a good relationship between production and chlorophyll in any given month, but the relationship varied from month to month. He has suggested that these differing production/chlorophyll relationships may be the result of changes in the species composition of the phytoplankton standing crop. While the variations observed by Rodhe are temporal rather than spatial, considerable differences in the composition of the phytoplankton standing crop would also be expected to occur in the different water masses of the Eastern Tropical Pacific. While we have no data to support this postulated difference in phytoplankton composition, we believe that some of the observed variability in the observed production/chlorophyll "a" relationship may be attributed to it.

The existence of a general relationship between chlorophyll and production, with a rather high degree of variability, and some evidence of differences in widely separated areas, undoubtedly results from the interaction of a number of factors. Factors that may be important in causing variability are: differences in species composition, differences in rate of photosynthesis of each species depending upon the spectral distribution and energy of the sub-surface radiation, nutrient conditions, and, perhaps, differences in the rate of photosynthesis per unit of chlorophyll related to the position of various components of the population on their growth curves and to their past history.

Elucidation of the effects of these and other factors will require much more detailed studies. However, it appears that in a very general way the

quantity of chlorophyll per unit volume of surface water provides a basis for estimating, albeit poorly, the rate of carbon fixation in the surface layer of the sea in the Eastern Tropical Pacific region. Low values of chlorophyll, less than about 0.2 mg/m^3 , indicate very low productivity (i. e. less than about $2 \text{ mgC/m}^3/\text{day}$). At higher chlorophyll levels, however, the variability in observed rates of carbon fixation is so great from one water mass to another that the error of estimation becomes very large.

There is a fair general agreement between the geographical distribution of chlorophyll "a," primary production, and zooplankton volume (Fig. 2, 3, and 4). The relationship between surface chlorophyll and zooplankton volumes is even better illustrated in Figure 14. It appears that surface chlorophyll provides a useful basis of estimating the standing crop of zooplankton in the Eastern Tropical Pacific.

CARBON FOURTEEN UPTAKE OF SAMPLES INCUBATED ON SHIPBOARD

Surface samples for which production was measured *in vitro* under constant illumination at the temperature of the sea surface exhibit no clear relationship between chlorophyll concentration and primary production per unit of illumination (Fig. 13).

Ryther (1956b, Fig. 2) has found in his studies with cultures of marine phytoplankton that the rate of production (measured by the oxygen method) per unit of chlorophyll "a" at a constant light intensity is nearly constant for a number of species. The Eastropic data do not seem to support Ryther's conclusions. Admittedly the experiments made at sea were rather unsatisfactory in that the light intensity to which our samples were subjected varied from experiment to experiment, although the light intensity remained constant during any one experiment (see page 131). Nevertheless our intensities were presumably below those which would cause saturation (see Ryther 1956a, Steeman-Nielsen, 1952), so that we would expect, on the basis of Ryther's experiments, to find a positive correlation between chlorophyll and primary production per unit of illumination.

In seeking a possible explanation of our results in relation to Ryther's experiments, it may be noted that the range of concentrations of chlorophyll and of production in his cultures were very much greater than the range of chlorophyll concentrations and of rates of carbon fixation we encountered on "Eastropic." Indeed, the range of Ryther's values apparently far exceeded those normally encountered in the sea, even in northern latitudes.

Attempts to equate the radiocarbon uptake of surface samples incubated on shipboard with the uptake observed in surface samples incubated *in situ*, by taking into account variations in incident solar radiation, have not met with success. This may be the result of our inability to secure sufficiently precise estimations of radiation in the area from climatic charts,

and our inadequate knowledge of the level of energy which causes the saturation of photosynthesis in natural populations. Similarly, the lack of submarine light measurements has prevented further analysis of results of incubator measurements of C^{14} uptake in samples taken from below the surface.

TIME VARIATION IN ZOOPLANKTON VOLUMES

Comparison between zooplankton volumes obtained during Shellback Expedition in 1952 (Fig. 15) and Eastropic in 1955 (Fig. 4) illustrates some of the variability that may occur in different seasons and years. The zooplankton volumes in the summer of 1952 were generally lower than in the fall of 1955. However, it is to be seen that certain areas of very high and very low standing crops appear in both years and in the same locations. Noteworthy are the area of high plankton volumes in the region of the Peru Current and along the equator, and the volumes off Central America. The paucity of organisms in the water some distance offshore from Baja California appears in both years. Inshore, along the Mexican coast, north of the Gulf of Tehuantepec, the zooplankton was poor in 1952 but rich in 1955.

COMPARISONS WITH OBSERVATIONS IN OTHER OCEANIC REGIONS

Steeman-Nielsen (1954) has reported on C^{14} productivity at a series of *Galathea* stations in the Pacific along a course from New Zealand to California. His values of production in the water column, per square meter of sea surface, were calculated from shipboard incubator determinations and light measurements at various depths in the sea. At the several stations along his section, lying between 140° and 180° W. longitude, he found production rates between 0.10 and 0.19 gC/m²/day, except in the vicinity of the equator where a value of 0.5 gC/m²/day was recorded, and at a station somewhat north of the equator, which he believes was "influenced by the divergences produced by the Counter Current" at which 0.26 gC/m²/day was found. Our value of 0.51 gC/m²/day at Station 24, on the equator, corresponds well with Steeman-Nielsen's results at his station near the equator. Our *in situ* value of 0.012 gC/m²/day at Station 31-11 is, however, much lower than the *Galathea* results at the same latitude, further westward, and the C^{14} uptake in the *in vitro* samples was likewise very low. This very low value is somewhat anomalous, and requires verification on a future cruise, before accepting it as representative of the region in which Station 31-11 was located.

Steeman-Nielsen's data as to high production on the equator with somewhat lower rates to the north and south have been confirmed by M. Oguri (personal communication), who made *in vitro* determinations of C^{14} uptake of surface samples at a number of stations in the region between 110° and 140° W. longitude and between 5° N. and 5° S. latitude from the

vessel *H. M. Smith* in the autumn of 1955, simultaneously with our studies further eastward. He found the C^{14} uptake in water samples from stations on the equator to be significantly higher than at 5° N. or 5° S. latitude.

Production found by us in the area of the "dome" off Central America ($0.414\text{--}0.779\text{ gC/m}^2/\text{day}$) is generally higher than anything encountered by Steeman-Nielsen in the Pacific, except in the coastal waters of New Zealand and the coastal waters off San Francisco. These rates of production in the area off Central America, and the even higher rate found by us at Station 57 near the north boundary of the Peru Current ($1.02\text{ gC/m}^2/\text{day}$) compare favorably with the most productive areas visited by the *Galathea*, in the southern part of the Benguela Current along the African coast, where Steeman-Nielsen has reported production rates of $0.46\text{--}2.5\text{ gC/m}^2/\text{day}$.

The values of chlorophyll, zooplankton volumes, and surface primary production in the very poor area offshore from Baja California, indicate that this region is among the least productive of oceanic areas, being, probably, as poor as the Sargasso Sea. It is of interest to note that this area lies not very far offshore from the region along the coast of Baja California, which, on the basis of zooplankton volumes measured on other cruises, is known to be quite productive.

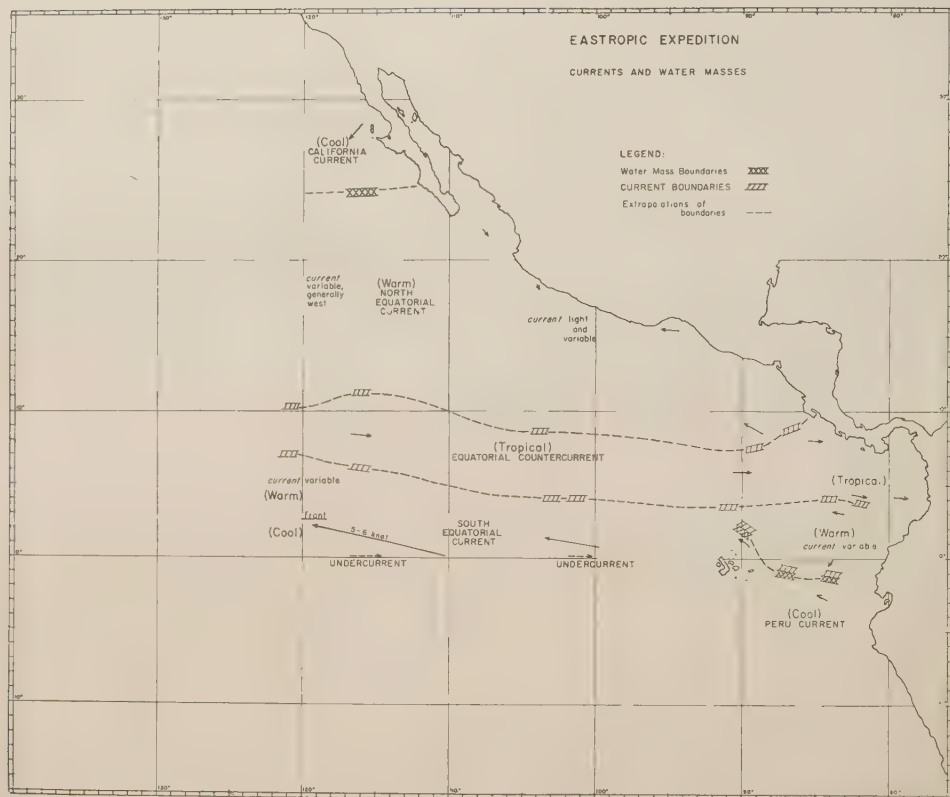


Figure 1. Currents and water masses in the Eastern Tropical Pacific encountered on the "Eastropic" cruise.

Figura 1. Corrientes y masas de agua en el Pacífico Oriental Tropical, encontradas durante la Expedición Eastropic.

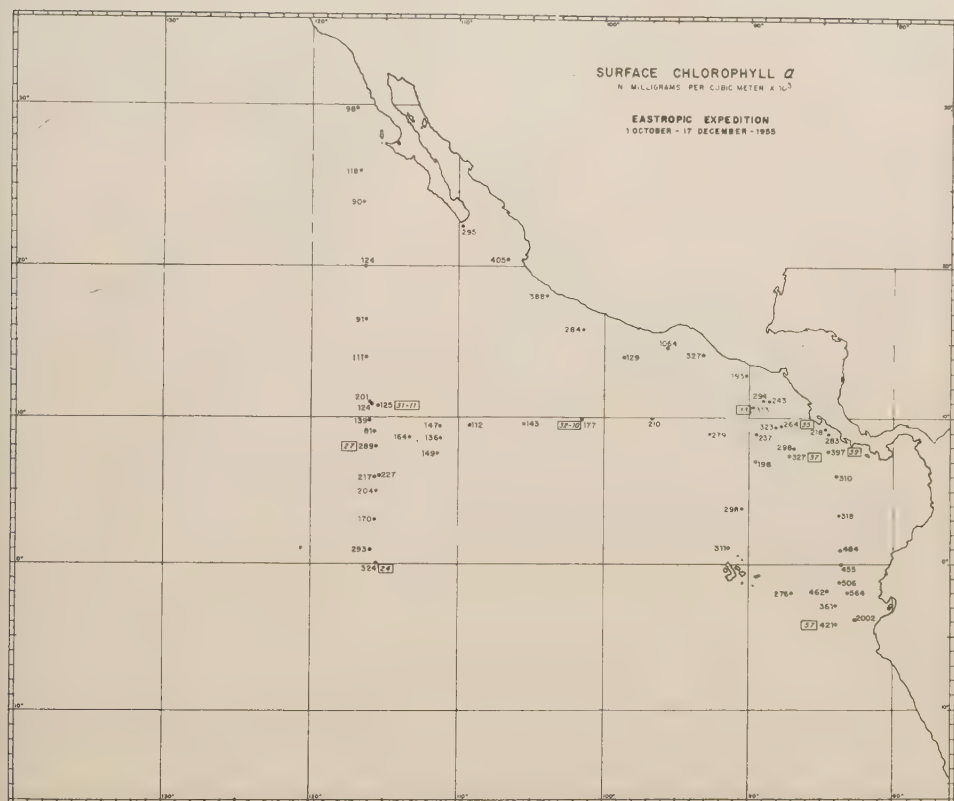


Figure 2. Surface chlorophyll "a" in milligrams per 1000 m³, at various locations, and positions of stations (station numbers in squares) at which were made sub-surface measurements of chlorophyll and C¹⁴ uptake.

Figura 2. Clorofila "a" de aguas superficiales, en miligramos por 1000 m³, en varias localidades, y posición de las estaciones (cuyos números aparecen dentro de cuadrados) en donde se hicieron mediciones de la clorofila en aguas subsuperficiales y de la asimilación de C¹⁴.

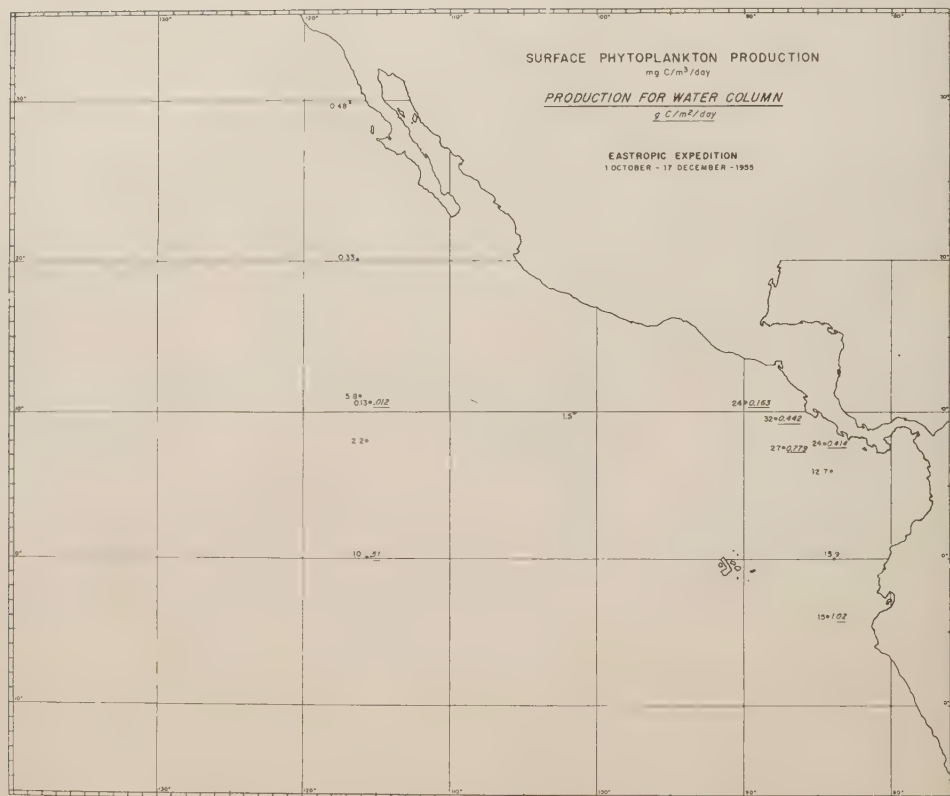


Figure 3. Surface phytoplankton production in mgC/m³/day, and total production in water column in gC/m²/day (latter underlined).

Figura 3. Producción de fitoplancton en aguas superficiales, en mgC/m³/día, y producción total en la columna de agua en gC/m²/día (los valores de esta última son los subrayados).

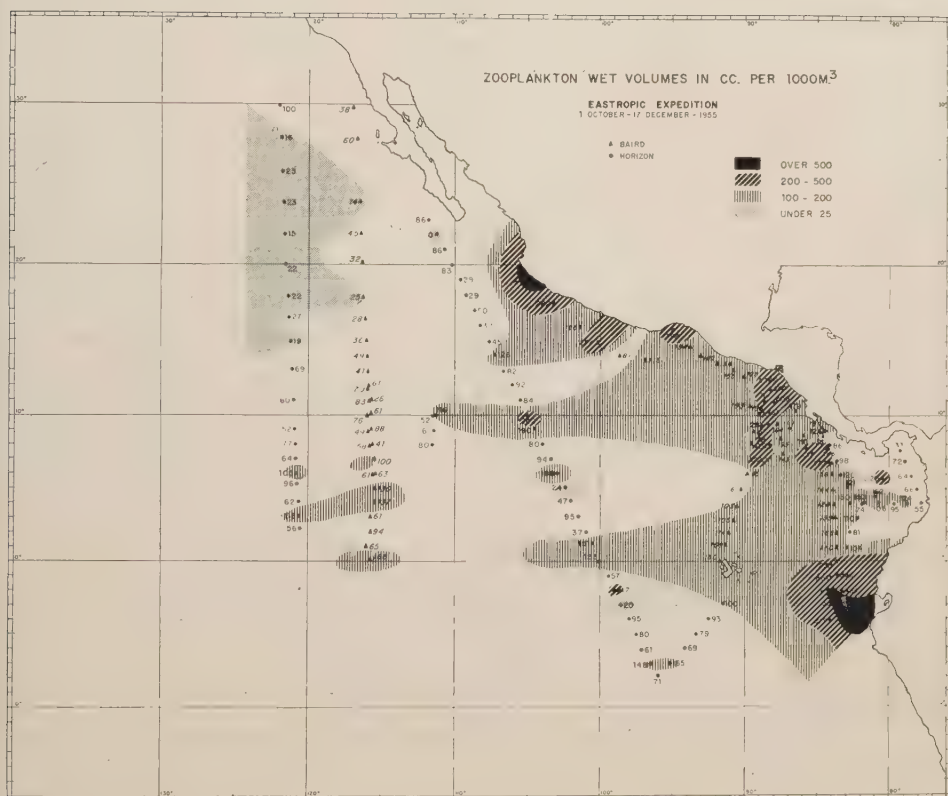


Figure 4. Locations of hydrographic stations occupied by the vessels *Baird* and *Horizon*, with the zooplankton volumes at each. Contours drawn for high volumes (over 100 cc/1000 m³) and low volumes (under 25 cc/1000 m³). Unshaded region represents volumes between 25 and 100 cc/1000 m³.

Figura 4. Localización de las estaciones hidrográficas establecidas por los barcos *Baird* y *Horizon*, con indicación de los volúmenes de zooplancton en cada una. Se han dibujado los contornos de los altos volúmenes (sobre 100 cc/1000 m³) y de los bajos volúmenes (menos de 25 cc/1000 m³). En la región no sombreada se encuentran los valores entre 25 y 100 cc/1000 m³.

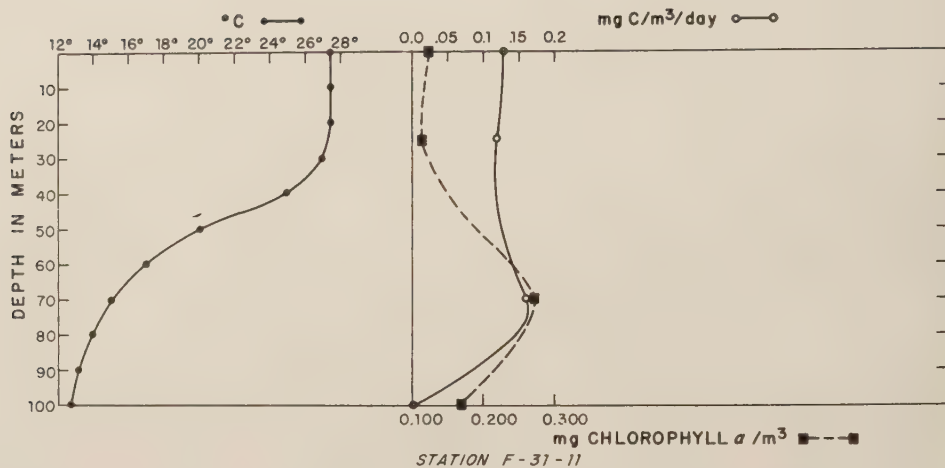


Figure 5. Vertical distributions of chlorophyll "a," C^{14} uptake, and temperature at Station F-31-11.

Figura 5. Distribuciones verticales de la clorofila "a", de la asimilación de C^{14} y de la temperatura en la Estación F-31-11.

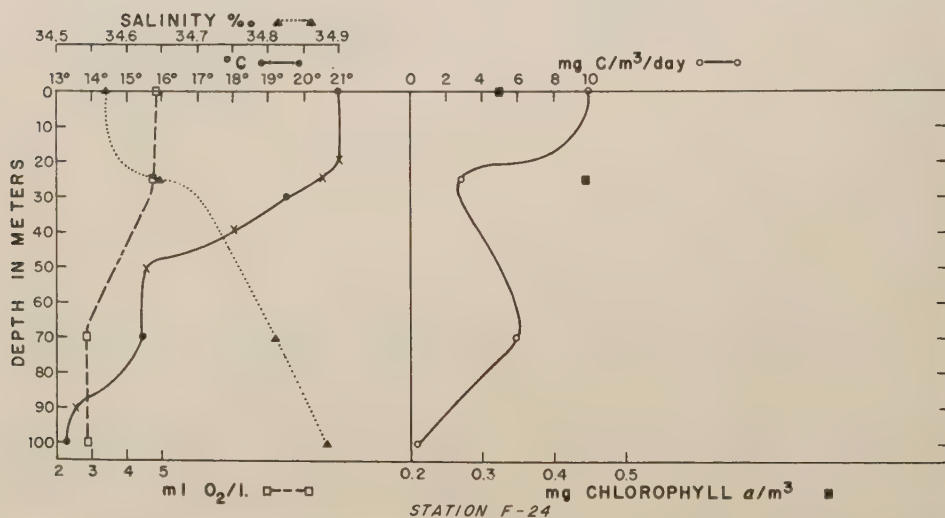


Figure 6. Vertical distributions of chlorophyll "a," C^{14} uptake, temperature, salinity, and oxygen at Station F-24.

Figure 6. Distribuciones verticales de la clorofila "a", de la asimilación de C^{14} , y de la temperatura, salinidad y oxígeno en la Estación F-24.

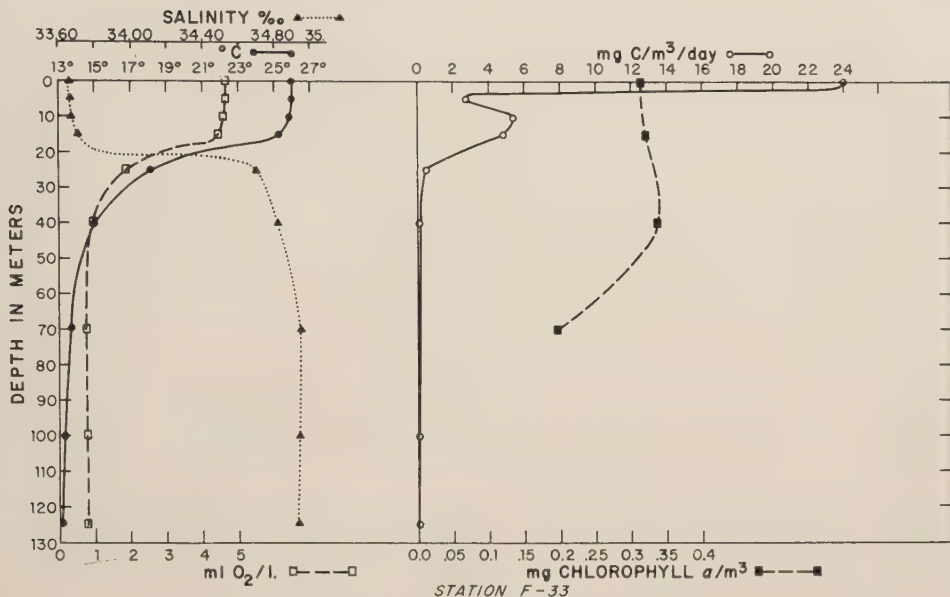


Figure 7. Vertical distributions of chlorophyll "a," C^{14} uptake, temperature, salinity, and oxygen at Station F-33.

Figura 7. Distribuciones verticales de la clorofila "a", de la asimilación de C^{14} , y de la temperatura, salinidad y oxígeno en la Estación F-33.

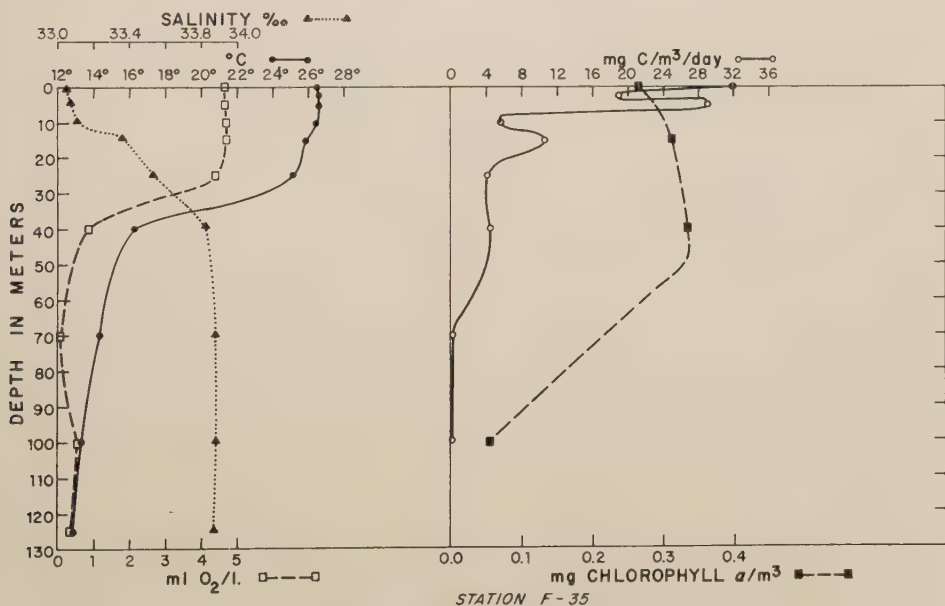


Figure 8. Vertical distributions of chlorophyll "a," C^{14} uptake, temperature, salinity, and oxygen at Station F-35.

Figura 8. Distribuciones verticales de la clorofila "a", de la asimilación de C^{14} y de la temperatura, salinidad y oxígeno en la Estación F-35.

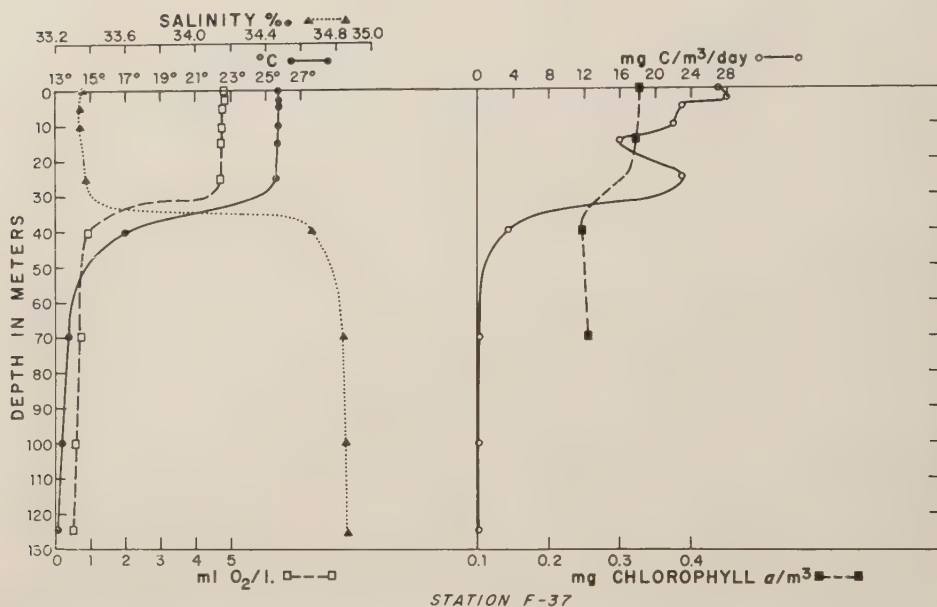


Figure 9. Vertical distributions of chlorophyll "a," C^{14} uptake, temperature, salinity, and oxygen at Station F-37.

Figura 9. Distribuciones verticales de la clorofila "a", de la asimilación de C^{14} , y de la temperatura, salinidad y oxígeno en la Estación F-37.

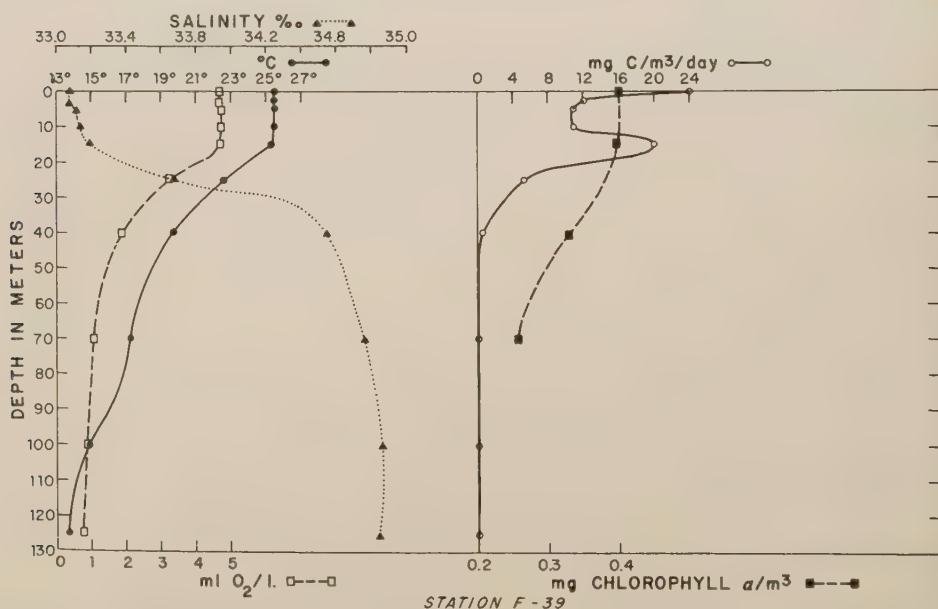


Figure 10. Vertical distributions of chlorophyll "a," C^{14} uptake, temperature, salinity, and oxygen at Station F-39.

Figura 10. Distribuciones verticales de la clorofila "a", de la asimilación de C^{14} , y de la temperatura, salinidad y oxígeno en la Estación F-39.

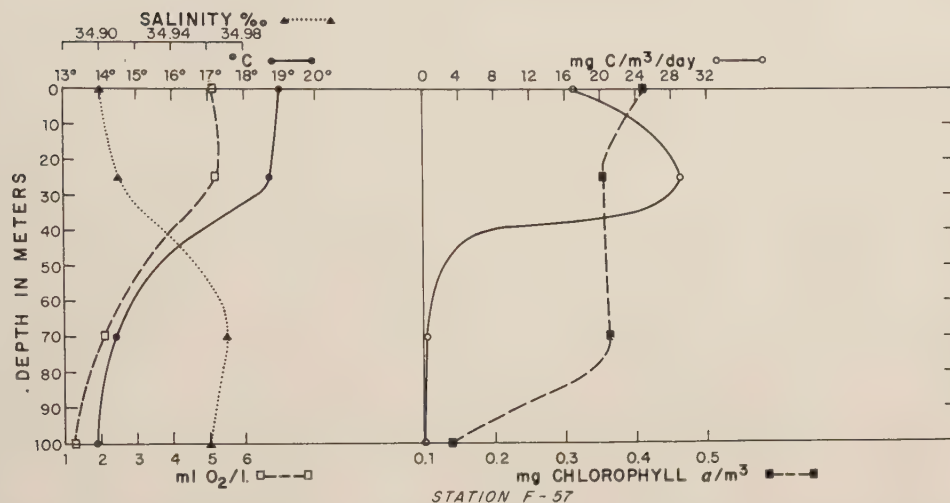


Figure 11. Vertical distributions of chlorophyll "a," C¹⁴ uptake, temperature, salinity, and oxygen at Station F-57.

Figura 11. Distribuciones verticales de la clorofila "a", de la asimilación de C¹⁴, y de la temperatura, salinidad y oxígeno en la Estación F-57.

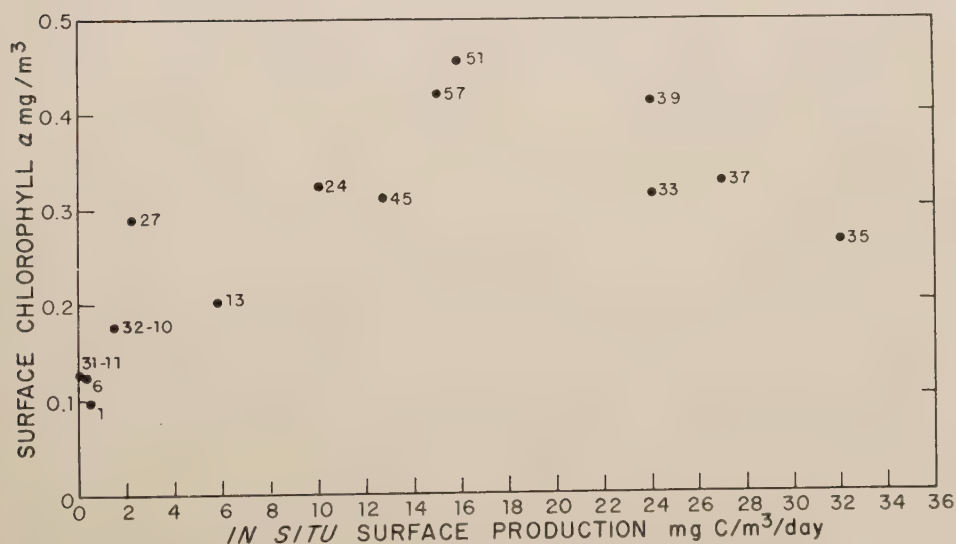


Figure 12. Relationship between *in situ* surface production and surface chlorophyll.

Figura 12. Relación entre la producción *in situ* y la clorofila, ambas de aguas superficiales.

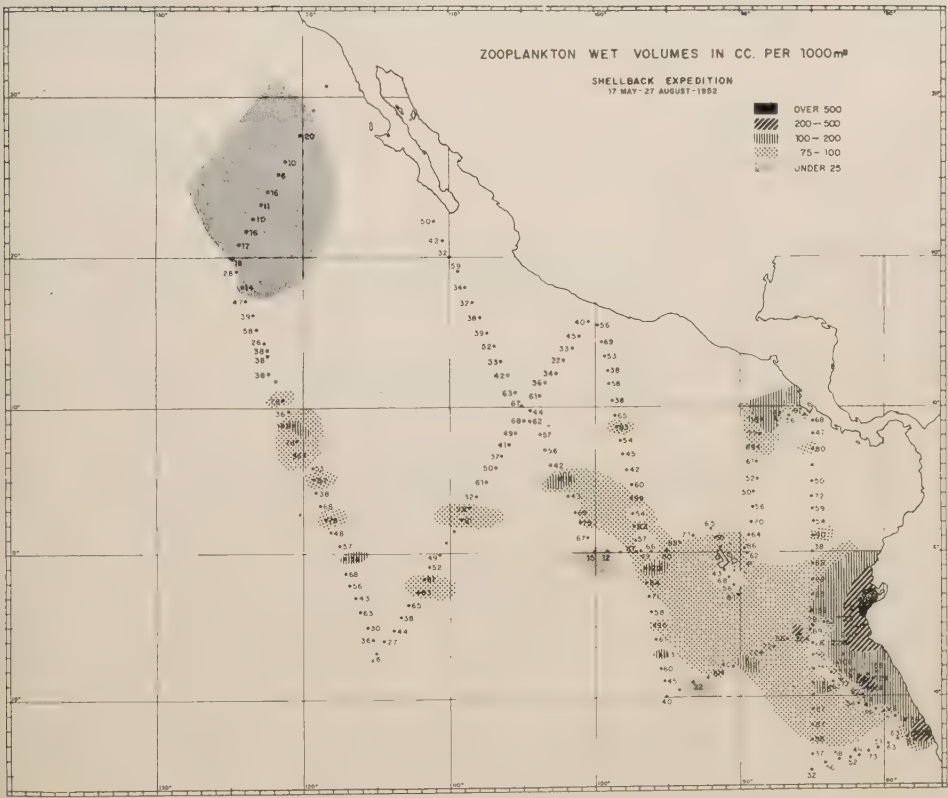


Figure 15. Zooplankton volumes measured by Shellback expedition in summer of 1952.

Figura 15. Volúmenes de zooplancton medidos durante la Expedición Shellback en el verano de 1952.

TABLE 1. Determinations of chlorophyll and primary production at stations of the Eastropic expedition, with related physical and chemical data.

TABLA 1. Determinaciones de la clorofila y de la producción primaria en las estaciones de la Expedición Eastropic, con datos sobre oceanografía física y química.

Station location	Date occupied 1955	Stat. No.	Depth in meters	Temp. °C	Salinity ‰	Dissolved oxygen ml/l	Primary production in water column gC/m ² /day	Primary production in situ mgC/m ² /day	Chlorophyll a, mg/m ³	Incubator production, mgC/m ³ /hr. at 1000 fc.
Localización de la estación	Fecha 1955	Número de la estación	Profundidad en metros	Temp. °C	Salinidad ‰	Oxígeno disuelto ml/l	Producción primaria en la columna de agua gC/m ² /día	Producción primaria in situ mgC/m ² /día	Clorofila a mg/m ³	Producción en la incubadora mgC/m ³ /hora a 1000 bp.
29°53'N	2 Oct.	1	Surface	19.32	33.65	5.51	.....	0.48	0.0976	.....
26°00'N	3 Oct.	3	Surface	20.75	33.71	5.29	.....	.....	0.118	.....
24°02'N	4 Oct.	4	Surface	23.21	34.22	4.99	.....	.....	0.0899	.....
20°09'N	5 Oct.	6	Surface	24.52	34.14	4.89	.....	0.33	0.124	0.070
16°31'N	6 Oct.	8	Surface	26.90	34.44	4.84	.....	.....	0.0911	.....
14°01'N	7 Oct.	10	Surface	27.07	33.70	4.75	.....	.....	0.111	.....
11°02'N	8 Oct.	13	Surface	27.62	33.76	4.64	.....	5.8	0.201	0.043
9°06'N	9 Oct.	13	40 m.	23.70	34.42	4.81	.....	.....	0.11	.....
9°06'N	9 Oct.	15	Surface	26.69	33.65	4.70	.....	.....	0.0814	.....
5°58'N	9 Oct.	15	40 m.	26.50	33.93	4.64	.....	.....	0.122	.....
5°00'N	10 Oct.	18	Surface	25.89	34.56	4.89	.....	.....	0.217	.....
3°05'N	10 Oct.	19	Surface	23.91	34.30	4.77	.....	.....	0.204	0.070
0°58'N	11 Oct.	21	Surface	23.61	34.33	4.87	.....	.....	0.170	.....
0°04'N	12 Oct.	23	Surface	23.01	34.31	4.81	.....	.....	0.293	.....
0°04'N	13 Oct.	24	Surface	20.97	34.57	4.86	0.51	10.	0.324	0.47
0°04'N	13 Oct.	24	25 m.	20.50	34.64	4.78	.....	2.8	0.445	0.47
0°04'N	13 Oct.	24	70 m.	15.40	34.81	2.83	.....	5.9	.....	1.2
6°00'N	13 Oct.	24	100 m.	13.29	34.88	2.97	.....	0.36	0.055	0.055
8°02'N	17 Oct.	25	Surface	25.85	34.52	.....	.....	2.2	0.227	0.62
8°02'N	18 Oct.	27	Surface	26.25	33.52	.....	.....	.....	0.289	.....
8°02'N	18 Oct.	27	25 m.	26.4	.....	.....	.....	.....	0.178	0.0060
10°58'N	18 Oct.	27	40 m.	26.5	.....	.....	.....	.....	0.199	.....
9°50'N	19 Oct.	30	Surface	27.30	33.47	.....	.....	.....	0.124	.....
10°41'N	20 Oct.	28-3	Surface	27.2	33.34	.....	0.012	0.13	0.139	.....
10°41'N	21 Oct.	31-11	Surface	27.4	.....	.....	.....	0.125	0.015	0.015
10°41'N	21 Oct.	31-11	25 m.	27.2	.....	.....	.....	0.12	0.114	0.017
10°41'N	21 Oct.	31-11	70 m.	15.6	.....	.....	.....	0.16	0.273	0.030
8°43'N	21 Oct.	31-11	100 m.	12.9	.....	.....	.....	0.02	0.169	0.0047
7°36'N	22 Oct.	31-22	Surface	26.7	33.16	.....	.....	.....	0.164	.....
8°39'N	23 Oct.	A-4	Surface	26.2	33.58	.....	.....	.....	0.149	.....
9°29'N	24 Oct.	A-5	Surface	26.5	.....	.....	.....	.....	0.136	.....
9°31'N	25 Oct.	A-6	Surface	26.4	.....	.....	.....	.....	0.147	.....
9°35'N	26 Oct.	31-50	Surface	26.4	33.30	.....	.....	.....	0.112	.....
9°57'N	27 Oct.	.....	Surface	.....	.....	.....	.....	.....	0.143	.....
9°57'N	28 Oct.	32-10	Surface	26.6	33.38	.....	.....	1.5	0.177	2.1

TABLE 1 CONTINUED

PRODUCTION, CHLOROPHYLL, AND ZOOPLANKTON

151

Station location	Date occupied 1955	Stat. No.	Depth in meters	Temp. °C	Salinity ‰	Dissolved oxygen ml/l	Primary production in water column gC/m ² /day	Primary production in situ mgC/m ³ /day	Chlorophyll a, mg/m ³	Incubator production, mgC/m ³ /hr. at 1000 fc.
Localización de la estación	Fecha 1955	Número de la estación	Profundidad en metros	Temp. °C	Salinidad ‰	Oxígeno disuelto ml/l	Producción primaria en la columna de agua gC/m ² /día	Producción primaria mgC/m ³ /día	Clorofila a mg/m ³	Producción en la incubadora mgC/m ³ /hora a 1000 bp.
9°57'N 101°33'W	28 Oct.	32-10	40 m.	18.2	...	...	...	...	0.394	...
9°57'N 101°33'W	28 Oct.	32-10	70 m.	13.9	...	...	...	...	0.239	...
9°56'N 96°45'W	29 Oct.	32-17	Surface	25.7	33.13	...	...	...	0.210	...
9°56'N 92°38'W	30 Oct.	32-26	Surface	25.4	33.26	...	...	...	0.279	...
11°05'N 98°58'W	31 Oct.	32-38	Surface	25.8	33.48	...	...	...	0.294	...
9°54'N 87°01'W	1 Nov.	32-51	Surface	25.4	33.48	...	...	...	0.298	...
9°21'N 88°06'W	2 Nov.	32-62	Surface	25.7	33.54	...	...	...	0.323	...
10°39'N 89°51'W	3 Nov.	33	Surface	26.01	33.66	4.68	0.163	24.	0.313	3.2
10°39'N 89°51'W	3 Nov.	33	2.5 m.	25.99	4.65	...	...	...	...	1.1
10°39'N 89°51'W	3 Nov.	33	5 m.	25.97	33.67	4.64	...	2.7	...	0.80
10°39'N 89°51'W	3 Nov.	33	10 m.	25.84	33.68	4.60	...	5.4	...	0.67
10°39'N 89°51'W	3 Nov.	33	15 m.	25.30	33.70	4.46	...	4.8	0.320	0.77
10°39'N 89°51'W	3 Nov.	33	25 m.	18.10	34.70	1.88	...	0.50	...	0.55
10°39'N 89°51'W	3 Nov.	33	40 m.	15.00	34.82	0.53	...	0.19	0.337	0.45
10°39'N 89°51'W	3 Nov.	33	70 m.	13.67	34.94	0.77	...	...	0.196	0.0065
10°39'N 89°51'W	3 Nov.	33	100 m.	13.33	34.94	0.78	...	0.08	...	0.0055
10°39'N 89°51'W	3 Nov.	33	125 m.	13.10	34.93	0.78	...	0.23	...	0.000
9°27'N 87°53'W	4 Nov.	35	Surface	26.53	33.04	4.68	0.442	32.	0.264	2.7
9°27'N 87°53'W	4 Nov.	35	2.5 m.	26.52	33.06	4.66	...	19.	...	1.3
9°27'N 87°53'W	4 Nov.	35	5 m.	26.51	33.08	4.67	...	29.	...	1.9
9°27'N 87°53'W	4 Nov.	35	10 m.	26.47	33.12	4.69	...	5.6	...	0.65
9°27'N 87°53'W	4 Nov.	35	15 m.	25.96	33.37	4.70	...	10.6	0.312	0.75
9°27'N 87°53'W	4 Nov.	35	25 m.	25.12	33.54	4.41	...	4.1	...	0.080
9°27'N 87°53'W	4 Nov.	35	40 m.	16.32	34.82	0.88	...	4.4	0.332	0.75
9°27'N 87°53'W	4 Nov.	35	70 m.	14.18	34.88	0.09	...	0.13	...	0.030
9°27'N 87°53'W	4 Nov.	35	100 m.	13.38	34.89	0.57	...	0.08	0.0543	0.012
9°27'N 87°53'W	4 Nov.	35	125 m.	12.91	34.87	0.45	...	...	...	0.006
7°33'N 87°21'W	5 Nov.	37	Surface	25.76	33.35	4.81	0.779	27.	0.327	1.1
7°33'N 87°21'W	5 Nov.	37	2.5 m.	25.75	33.35	4.80	...	28.	...	1.5
7°33'N 87°21'W	5 Nov.	37	5 m.	25.74	33.34	4.78	...	23.	...	1.9
7°33'N 87°21'W	5 Nov.	37	10 m.	25.72	33.34	4.76	...	22.	...	0.70
7°33'N 87°21'W	5 Nov.	37	15 m.	25.67	33.35	4.77	...	16.	0.324	1.6
7°33'N 87°21'W	5 Nov.	37	25 m.	25.47	33.38	4.75	...	23.	...	1.6
7°33'N 87°21'W	5 Nov.	37	40 m.	16.98	34.66	0.98	...	3.3	0.249	0.72
7°33'N 87°21'W	5 Nov.	37	70 m.	13.69	34.84	0.70	...	0.16	0.256	0.023
7°33'N 87°21'W	5 Nov.	37	100 m.	13.31	34.85	0.58	...	0.056	...	0.017
7°33'N 87°21'W	5 Nov.	37	125 m.	13.07	34.86	0.54	...	0.040	...	0.000
7°51'N 84°34'W	6 Nov.	39	Surface	25.54	33.08	4.66	0.414	24.	0.397	...

TABLE 2. Eastropic Expedition — *Spencer F. Baird* Plankton collections.TABLA 2. Expedición Eastropic — Recolectores de plancton del *Spencer F. Baird*.

Station	Position		Date 1955	Time (local)		Vol. water strained in m ³	Depth of haul in meters	Volume per 1000 M ³ strained	
	Latitude	W. Long.		Start	End			Total cc.	Small Org. cc.
Estación	Posición		Fecha 1955	Hora (local)		Volumen de agua colada en m ³	Profundidad del arrastre en metros	Volumen por cada 1000 m ³ de agua	
	Latitud	Long. O.		Emp.	Term.			Total en cc.	Pequeños org. en cc.
F- 1	29°50'N	116°55'	2 Oct.	1121	1154	1056	293	66	38
2	27°54'N	116°47'	3 "	0036	0108	916	330	306	60
4	24°02'N	116°31'	4 "	0921	0953	1053	305	14	14
5	22°00'N	116°23'	5 "	0021	0054	900	333	45	45
6	20°09'N	116°16'	5 "	1236	1308	952	330	32	32
7	17°56'N	116°12'	6 "	0231	0303	1000	317	197	25
8	16°31'N	116°13'	6 "	1351	1423	901	380	28	28
9	15°03'N	116°14'	7 "	0026	0058	978	312	36	36
10	14°01'N	116°13'	7 "	0851	0923	1026	291	215	49
11	13°00'N	116°11'	7 "	1806	1838	972	303	92	41
12	12°05'N	116°09'	8 "	0151	0232	902	308	61	61
13	11°02'N	116°05'	8 "	1221	1253	889	330	28	28
14	10°01'N	115°55'	8 "	1921	1953	926	310	82	76
15	9°06'N	115°44'	9 "	0501	0533	1029	308	97	88
16	8°00'N	115°37'	9 "	1351	1443	967	331	48	41
17	7°02'N	115°40'	9 "	2226	2259	1099	301	200	100
18	5°58'N	115°43'	10 "	0821	0853	1194	331	63	63
19	5°00'N	115°36'	10 "	1841	1913	960	325	153	130
20	4°04'N	115°35'	11 "	0851	0423	1392	194	137	137
21	3°05'N	115°44'	11 "	1236	1308	825	321	61	61
22	2°00'N	115°41'	11 "	2151	2223	904	299	94	94
23	0°58'N	116°03'	12 "	0706	0738	1488	168	239	65
24	0°04'N	115°39'	12 "	2221	2253	752	300	511	166
25	6°00'N	115°24'	17 "	1521	1553	990	322	61	61
27	8°02'N	115°40'	18 "	0751	0823	942	297	58	58
28	9°03'N	115°48'	18 "	1722	1754	1031	314	49	49
29	9°58'N	115°58'	19 "	0051	0123	978	325	61	61
30	10°58'N	115°58'	19 "	0822	0854	1032	308	126	83
31	11°41'N	115°59'	19 "	1451	1523	927	325	70	70
33	10°39'N	89°51'	3 Nov.	0951	1032	986	293	193	193
34	10°03'N	88°52'	3 "	2106	2138	1026	309	195	195
35	9°27'N	87°53'	4 "	1021	1053	948	323	164	164
36	8°24'N	87°37'	4 "	2321	2332	946	319	195	195
37	7°33'N	87°21'	5 "	0850	0923	980	307	161	143
38	7°47'N	85°45'	5 "	2221	2253	867	318	238	225
40	8°39'N	84°46'	6 "	2051	2123	1067	286	38	38
42	8°54'N	84°42'	11 "	0851	0922	957	296	199	199
43	7°53'N	84°32'	11 "	1651	1723	1120	254	246	246
44	6°54'N	84°21'	12 "	0121	0153	951	314	253	253
45	6°04'N	84°09'	12 "	0921	0952	919	314	136	136

TABLE 2 CONTINUED

Station	Position		Date 1955	Time (local)		Vol. water strained in m ³	Depth of haul in meters	Volume per 1000 M ³ strained	
	Latitude	W. Long.		Start	End			Total cc.	Small Org. cc.
Estación	Posición		Fecha 1955	Hora (local)		Volumen de agua colada en m ³	Profundidad del arrastre en metros	Volumen por cada 1000 m ³ de agua	
	Latitud	Long. O.		Emp.	Term.			Total en cc.	Pequeños org. en cc.
46	5°02'N	84°03'	12 Nov.	1821	1853	1007	298	144	144
47	4°02'N	83°56'	13 "	0306	0338	977	336	128	128
48	3°02'N	83°51'	13 "	1050	1123	941	306	159	159
49	1°59'N	83°50'	13 "	1851	1923	1085	267	166	166
50	0°58'N	83°49'	14 "	0221	0254	972	318	170	170
51	0°60'	83°47'	14 "	2011	2023	989	280	233	233
52	0°58'S	83°50'	16 "	0251	0323	753	312	302	292
53	2°02'S	83°52'	16 "	1151	1223	578	348	571	571
54	2°54'S	83°35'	16 "	2051	2123	811	314	554	554
55	3°42'S	83°06'	17 "	0521	0553	612	314	621	605
56	1°59'S	83°20'	20 "	2051	2123	772	293	486	486
57	4°03'S	84°11'	22 "	1721	1753	868	289	219	219
58	0°00'	91°41'	27 "	2206	2238	960	296	130	130
59	1°06'N	91°31'	28 "	0651	0723	1012	318	121	109
60	1°58'N	91°17'	28 "	1436	1508	1230	225	114	114
61	2°51'N	90°52'	28 "	2321	2353	953	293	105	105
62	3°49'N	90°37'	29 "	0736	0808	1018	274	103	103
63	5°00'N	90°20'	29 "	1621	1653	1235	300	82	61
64	6°05'N	89°57'	30 "	0251	0323	1018	306	95	95
65	7°02'N	89°39'	30 "	1051	1123	1221	292	220	220
66	8°03'N	89°43'	30 "	2206	2238	970	306	172	172
67	8°54'N	89°36'	1 Dec.	0851	0923	957	298	167	167
68	10°02'N	89°07'	1 "	1951	2023	972	298	463	463
69	11°02'N	88°46'	2 "	0621	0653	1068	263	314	314
70	11°48'N	88°25'	2 "	1836	1908	885	302	300	300
76	12°24'N	89°06'	6 "	2221	2353	986	302	305	289
77	12°44'N	90°01'	7 "	0521	0553	1016	297	128	128
78	13°05'N	90°54'	7 "	1306	1338	946	309	153	153
79	13°31'N	92°02'	7 "	2051	2123	896	363	141	134
80	14°05'N	93°05'	8 "	0521	0553	961	305	182	182
81	14°39'N	93°55'	8 "	1251	1323	979	301	209	194
82	15°48'N	95°03'	8 "	2255	2313	583	152	309	298
85	13°42'N	97°01'	9 "	1920	1938	1016	153	113	113
87	14°02'N	98°42'	10 "	1751	1823	991	292	81	81
88	14°58'N	100°14'	11 "	0051	0123	946	307	254	254
89	15°58'N	101°32'	11 "	1121	1153	993	298	126	126
90	17°27'N	103°19'	12 "	0321	0353	992	318	282	282
91	19°00'N	104°57'	12 "	1921	1953	990	293	515	515

TABLE 3. Eastropic Expedition — *Horizon* Plankton collections.TABLA 3. Expedición Eastropic — Recolectores de plancton del *Horizon*.

Station	Position		Date 1955	Time (local)		Vol. water strained in M ³	Depth of Haul in Meters	Volume per 1000 m ³ Strained	
	Latitude	W. Long.		Start	End			Total cc.	Small org. cc.
Estación	Posición		Fecha 1955	Hora (local)		Volumen de agua colada en M ³	Profundidad del arrastre en metros	Volumen por cada 1000 M ³ de agua	
	Latitud	Long. O.		Emp.	Term.			Total en cc.	Pequeños org. en cc.
H- 1	29°56'N	121°59'	2 Oct.	2111	2143	905	322	100	100
2	28°03'N	121°49'	3 "	0911	0943	903	311	348	16
3	25°58'N	121°48'	4 "	0051	0122	872	288	23	23
4	24°00'N	121°41'	4 "	1611	1643	870	320	23	23
5	22°00'N	121°35'	5 "	0621	0652	671	320	15	15
6	20°00'N	121°31'	5 "	2121	2153	907	324	22	22
7	17°57'N	121°26'	6 "	1141	1213	901	323	22	22
8	16°31'N	121°21'	6 "	2341	0014	738	330	27	27
9	14°58'N	121°15'	7 "	1121	1153	1061	312	19	19
11	13°02'N	121°03'	8 "	0242	0313	870	304	69	69
13	11°00'N	120°56'	8 "	2141	2213	835	305	88	60
15	9°00'N	120°48'	9 "	1321	1352	861	313	52	52
16	8°00'N	120°47'	9 "	2221	2253	720	309	77	77
17	7°00'N	120°46'	10 "	0841	0912	1020	322	64	64
18	6°01'N	120°46'	10 "	1701	1733	814	331	105	105
19	5°21'N	120°31'	11 "	0211	0252	833	307	127	96
20	4°01'N	120°40'	11 "	1331	1404	975	302	183	62
21	3°01'N	120°32'	12 "	0011	0043	891	329	218	112
22	2°10'N	120°32'	12 "	0901	0933	539	223	705	56
23	9°58'N	111°28'	23 "	1221	1254	1061	277	52	52
24	9°00'N	111°25'	23 "	2121	2153	907	295	61	61
25	8°00'N	111°33'	24 "	0911	0944	809	306	80	80
27	10°00'N	111°08'	25 "	2231	2303	866	292	129	116
29	7°54'N	89°15'	3 Nov.	1501	1533	880	280	205	205
30	9°29'N	88°25'	4 "	0521	0554	718	290	286	286
31	10°52'N	88°02'	4 "	1911	1944	1027	292	209	209
32	10°17'N	86°33'	5 "	1101	1123	1060	266	179	179
33	9°12'N	87°06'	5 "	2221	2254	885	295	147	147
34	8°41'N	86°00'	6 "	1651	1723	1192	281	189	191
35	9°01'N	84°32'	10 "	1521	1553	991	306	187	126
36	7°58'N	84°10'	10 "	2351	0023	1047	279	86	86
37	6°55'N	83°38'	11 "	0111	1043	1070	260	145	98
38	5°55'N	83°26'	11 "	1801	1834	1045	281	120	120
39	5°07'N	82°52'	12 "	0250	0323	1031	320	121	121
40	4°02'N	82°48'	12 "	1131	1204	926	320	130	130
41	4°03'N	81°45'	12 "	2051	2124	1081	295	153	153
42	4°03'N	80°46'	13 "	0531	0604	1038	286	106	106
43	4°02'N	79°46'	13 "	1411	1443	1155	269	95	95
44	4°03'N	78°47'	13 "	2151	2223	809	329	124	124
45	4°05'N	77°45'	14 "	1000	1033	1279	228	55	55
46	5°00'N	78°09'	14 "	1811	1844	1144	302	66	66
47	5°49'N	78°31'	15 "	0641	0713	937	275	64	64
48	6°52'N	78°54'	15 "	1711	1744	1117	271	92	72
49	7°42'N	79°20'	16 "	0126	0143	888	130	130	33
52	5°43'N	80°31'	19 "	1436	1509	1068	258	225	225

TABLE 3 CONTINUED

Station	Position		Date 1955	Time (local)		Vol. water strained in M ³	Depth of Haul in Meters	Volume per 1000 m ³ Strained	
	Latitude	W. Long.		Start	End			Total cc.	Small org. cc.
Estación	Posición		Fecha 1955	Hora (local)		Volumen de agua colada en M ³	Profundidad del arrastre en metros	Volumen por cada 1000 M ³ de agua	
	Latitud	Long. O.		Emp.	Term.			Total en cc.	Pequeños org. en cc.
53	4° 37' N	81° 02'	20 Nov.	0201	0234	801	293	462	162
54	4° 08' N	81° 48'	20 "	1222	1253	946	296	74	74
55	3° 01' N	82° 15'	21 "	0022	0053	1003	242	110	110
56	2° 03' N	82° 45'	21 "	0931	1004	985	252	81	81
57	0° 57' N	82° 57'	21 "	1741	1813	1155	236	104	104
59	1° 02' S	84° 05'	22 "	0052	0123	913	276	261	261
61	2° 56' S	91° 32'	29 "	1021	1032	901	240	266	100
62	3° 59' S	92° 27'	29 "	1931	2003	698	324	3678	93
63	5° 00' S	93° 19'	30 "	0521	0553	726	281	258	79
64	6° 00' S	94° 13'	30 "	1521	1553	728	307	69	69
65	7° 00' S	95° 08'	1 Dec.	0131	0202	789	298	165	165
66	7° 53' S	96° 00'	1 "	1121	1153	637	313	71	71
67	7° 00' S	96° 33'	2 "	0311	0343	710	305	148	148
68	6° 02' S	97° 10'	2 "	1231	1305	822	366	61	61
69	5° 00' S	97° 30'	2 "	2001	2033	876	286	434	80
70	4° 01' S	98° 03'	3 "	0421	0453	788	281	95	95
71	3° 00' S	98° 37'	3 "	1232	1303	991	256	308	20
72	1° 59' S	99° 05'	3 "	2101	2134	808	298	4253	217
73	0° 58' S	99° 28'	4 "	0651	0723	788	307	953	57
74	0° 00'	100° 03'	4 "	1621	1653	811	306	142	123
75	1° 14' N	100° 34'	7 "	0011	0044	797	312	151	151
76	2° 01' N	101° 00'	7 "	0812	0844	958	307	37	37
77	3° 03' N	101° 35'	7 "	1851	1923	739	325	95	95
78	4° 08' N	102° 02'	8 "	0411	0444	847	283	47	47
79	5° 05' N	102° 26'	8 "	1142	1213	839	318	24	24
80	6° 00' N	102° 58'	8 "	2001	2034	799	291	250	188
81	6° 59' N	103° 25'	9 "	0441	0513	908	272	94	94
82	8° 00' N	104° 00'	9 "	1421	1452	812	293	80	80
83	9° 03' N	104° 34'	10 "	0001	0033	790	230	311	190
84	10° 00' N	105° 05'	10 "	0711	0744	763	277	242	242
85	10° 59' N	105° 35'	10 "	1514	1542	835	252	84	84
86	12° 01' N	105° 59'	10 "	2311	2343	818	310	92	92
87	13° 00' N	106° 38'	11 "	0831	0903	920	289	112	82
88	14° 04' N	107° 13'	11 "	1651	1724	875	272	268	126
89	14° 58' N	107° 37'	12 "	0052	0124	788	299	273	45
90	16° 00' N	108° 09'	12 "	0921	0953	929	241	32	32
91	17° 00' N	108° 38'	12 "	1721	1753	903	308	50	50
92	18° 02' N	109° 12'	13 "	0102	0132	875	243	29	29
93	19° 01' N	109° 40'	13 "	0851	0923	868	261	29	29
94	20° 00' N	110° 15'	13 "	1641	1713	787	285	128	83
95	21° 00' N	110° 38'	14 "	0121	0152	819	270	86	86
96	22° 00' N	111° 09'	14 "	0831	0903	729	296	357	0
97	22° 56' N	111° 43'	14 "	1631	1703	814	277	161	86

PRODUCCION PRIMARIA, CLOROFILA, Y VOLUMENES DEL ZOOPLANKTON EN LA ZONA TROPICAL DEL OCEANO PACIFICO ORIENTAL¹

por

Robert W. Holmes², Milner B. Schaefer^{2,3}, y Bell M. Shimada³

Entre el 1° de octubre y el 17 de diciembre de 1955, a bordo de los barcos *Horizon* y *Spencer F. Baird*, de la Institución Scripps de Oceanografía de la Universidad de California, se hicieron investigaciones sobre la oceanografía física, química y biológica del Océano Pacífico Oriental, en una región limitada aproximadamente por los 30° N. de latitud, 9° S. de latitud, 120° O. de longitud y la costa continental. Estas investigaciones fueron parte de una operación que se realizó cooperativamente y a la que se convino darle el nombre codificado de "Eastropic". En ella, durante el mismo periodo, una embarcación del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (U. S. Fish and Wildlife Service) trabajó más hacia el oeste, y un barco de la armada peruana más hacia el sur, frente a la costa del Perú. También colaboró una nave del Laboratorio de Pesquerías del Estado de California (California State Fisheries Laboratory), realizando algunas operaciones de pesca de atún en aguas subsuperficiales, y otros estudios en la misma región general que recorrieron las embarcaciones de Scripps.

Además de efectuar estudios especiales relacionados con las características oceanográficas particulares de la región, las naves de Scripps establecieron un buen número de estaciones hidrográficas. La localización de estas estaciones se indica en la Figura 4 y en las Tablas 2 y 3; en cada una de ellas se hicieron rastreos con redes planctónicas para recoger muestras de zooplancton. En algunas de las estaciones hidrográficas, así como en algunos lugares entre estaciones, en el *Spencer F. Baird* se hicieron mediciones de la clorofila "a" y de la producción primaria (mediante la técnica del C¹⁴), tanto *in situ* como en una incubadora instalada a bordo. El propósito del presente trabajo es dar a conocer los resultados de estas observaciones biológicas.

Los autores desean expresar su gratitud a los Drs. Francis T. Haxo y William H. Thomas y al Sr. Elmer Squier, por su asesoramiento y ayuda en la construcción de la incubadora que se instaló a bordo.

¹Contribución de la Institución Scripps de Oceanografía, Nueva Serie No. 942. El presente estudio abarca, en parte, los resultados de la investigación efectuada por la Universidad de California bajo contrato con la Oficina de Investigación Naval.

²Institución Scripps de Oceanografía.

³Comisión Interamericana del Atún Tropical.

MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CLOROFILA, DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA Y DE LA CANTIDAD DE ZOOPLANKTON

Clorofila "a"

Las muestras de agua de la superficie, para la determinación de la clorofila, fueron recolectadas con un cubo plástico tanto en las estaciones hidrográficas como durante la travesía. En las estaciones se usó un recipiente de lucite Van Dorn (1956) para la recolección de muestras subsuperficiales. El agua de las muestras (8.3 litros, y en algunas áreas ricas 4.1 l.) se filtró por uno o dos filtros Millipore de 47-mm., tipo HA, después de agregarle una pequeña cantidad de carbonato de magnesio. La clorofila fue extraída de cada filtro con 3 mls. de acetona al 90% (grado reactivo) al frío (ca. 10° C.) y en la obscuridad durante 10 horas aproximadamente. El material extraído de cada muestra fue entonces centrifugado hasta aclararlo y decantado en un frasco volumétrico de 10 ml. Con el precipitado que quedó en el tubo de la centrífuga se hizo una nueva suspensión en 3 mls. de acetona al 90%, la cual fue centrifugada otra vez y el líquido resultante se combinó con el obtenido previamente. El extracto fue diluido entonces a 10 mls., y su densidad óptica medida en una célula de semi-micro absorción de 10 cm., a 750, 665, 645 y 635 m μ , con un espectrofotómetro de Beckman modelo DU. Las correcciones de turbiedad se hicieron a base de la transmisión a 750 m μ . y las concentraciones de clorofila "a" fueron calculadas por la ecuación de Richards y Thompson (1952) y aparecen en la Tabla 1.

Producción primaria

El método del C¹⁴ fue empleado en este estudio para determinar la proporción de la fijación del carbón por el fitoplancton. Siguiendo el precedente sentado por Ryther (1956b) hemos considerado la tasa de la asimilación de C¹⁴ como sinónimo del término "producción primaria".

La solución C¹⁴ fue preparada en la forma descrita por Steeman-Nielsen (1952), con la excepción de que se usó, como solvente para el Na₂C¹⁴O₃, agua redestilada en aparatos de vidrio en vez de agua artificial de mar. Se prepararon dos soluciones: una conteniendo aproximadamente 100 μ C/ml. (que se empleó en las Estaciones 1 a 41 inclusive), y la otra con 20 μ C/ml. (usada en las Estaciones 45 a 57 inclusive). Alícuotas de 1 ml. de estas soluciones se envasaron en ampollitas de la misma medida (1 ml.), las cuales sin dilación fueron selladas y cerradas herméticamente. La técnica de regularización aplicada fue la misma de Steeman-Nielsen (1952), pero se usaron filtros Millipore en vez de filtros de colodión.

Los estudios *in situ* se realizaron de la siguiente manera: se recogió una muestra de cada una de las profundidades deseadas por medio del cubo de lucite Van Dorn, poco tiempo antes de amanecer. Las muestras se envasaron en botellas Pyrex de 250 ml. La solución C¹⁴ fue pasada cuidadosamente de

la ampollita a la muestra de agua con una jeringa hipodérmica provista de aguja, siendo cada ampollita enjuagada tres veces con el agua de la muestra. Las muestras fueron puestas en el mar otra vez al amanecer, aproximadamente a las mismas profundidades en que fueron recogidas, con la ayuda de una cuerda con pesos en su extremo, sostenida de una boya de cristal de libre flote, de 14 pulgadas de diámetro, forrada de tejido de cuerda y sujeta a una caña de bambú con un banderín en su extremo superior para facilitar su localización a simple vista. La muestra de "superficie" fué sujeta al lado de la boya, apenas debajo de la capa superficial del agua, mediante el amarre de la botella al tejido en que estaba forrada la bola de cristal. El período de incubación se terminó al mediodía. Inmediatamente después de la incubación, las muestras se pasaron por filtros Millipore (simples) de 47 mm., tipo HA. Los filtros fueron secados exponiéndolos al vapor de HCl concentrado durante 20 minutos, y vueltos a secar con sílice gelatinosa antes de contar. La actividad del filtro fué medida usando un tubo ANTON 1001-T con un medidor Nuclear-Chicago (Mod. 182A).

Los valores de la producción primaria (Tabla 1) fueron calculados de acuerdo con la actividad del filtro, según el procedimiento indicado por Steeman-Nielsen (1952). Estos datos no han sufrido corrección por cualesquiera pérdidas de carbón que pudieran haber ocurrido durante las horas de obscuridad. La producción primaria en la *columna de agua* ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{día}$) fué estimada por integración, con un planímetro, de los suavizados perfiles de producción a profundidad (Figuras 6 a 11), en cada estación.

Las muestras tratadas en la incubadora a bordo, fueron recogidas e inoculadas con C^{14} en la misma forma que las muestras utilizadas en los estudios *in situ*. La temperatura en la incubadora fué mantenida dentro de 1°C de diferencia de la que fué observada en la superficie del mar cuando se recogieron las muestras. La intensidad de la luz a que fueron expuestas las muestras durante un experimento de 4 horas fué casi constante. Al comienzo de la expedición, la intensidad de luz que iluminaba el fondo de los frascos de reacción fué de alrededor de 1100 bujías-pies; la intensidad decreció despaciosamente, conforme se desgastaban las lámparas fluorescentes del tipo de luz de día, y el reflector colocado detrás de las lámparas se tornaba opaco. En consecuencia, las últimas muestras colocadas en la incubadora recibieron una iluminación de sólo 600 bujías-pies. Con el objeto de hacer comparables los resultados de los diferentes experimentos, hemos dado la proporción de carbón alcanzada en términos de $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{hr.}$ a una intensidad de 1000 bujías-pies. Esta intensidad fué seleccionada como una alta luminosidad, que se consideró por debajo de la que podría causar saturación y que, sin embargo, se encuentra todavía en la porción lineal de la curva en que la fotosíntesis está en relación con la intensidad de la luz. La intensidad promedio a que fué sometida la población vegetal fué algo menor de 1000 bujías-pies, si se toma en cuenta la disminución en intensidad hacia el cuello de la botella.

Cuando no se hicieron series verticales de observaciones, la producción primaria superficial *in situ* se determinó mediante las muestras sacadas de la superficie del mar con un cubo plástico a la salida del sol o pocos momentos antes. Las muestras fueron envasadas en botellas Pyrex, inoculadas con C^{14} , y remolcadas hasta mediodía por la popa del barco de modo que quedaran justamente bajo la superficie. El tratamiento posterior de las muestras fué idéntico al que se describió anteriormente con respecto a las series verticales *in situ*. Los resultados se dan a conocer como $mgC/m^3/día$, en la Tabla 1.

Las muestras recogidas para la determinación de la producción primaria fueron duplicadas muy pocas veces, y no se intentó un estudio completo de la variabilidad causada por el muestreo. Sin embargo, en seis estaciones (Nos. 6, 13, 19, 32-10, 45 y 55) se recogieron dos muestras del mismo cubo de agua superficial, y los resultados de su C^{14} determinación fueron medidos después de la incubación a bordo. También fueron tomadas dos muestras del mismo cubo en la Estación 1, las cuales fueron incubadas en botellas que se remolcaron por la popa de la embarcación. En cuatro de los siete casos, los duplicados concordaron entre sí dentro de $\pm 10\%$; en un caso concordaron dentro de $\pm 20\%$; y en los dos casos restantes el acuerdo fué muy pobre ($\pm 100\%$). Los valores que proporciona la Tabla 1, que se emplean en el curso de este estudio, representan los promedios de los duplicados en las mencionadas estaciones.

No se comprende la razón de esta variabilidad. Hemos encontrado variaciones similares en otras áreas, y el Dr. W. H. Thomas, de la Institución Scripps de Oceanografía, en sus estudios frente al Delta del Río Misisipí en el Golfo de México, ha podido apreciar también una variabilidad similar (comunicación personal). Pareciera que generalmente los resultados de la determinación del C^{14} concuerdan bastante bien en las muestras duplicadas, pero que ocasionalmente el desacuerdo entre ellas es grande; con frecuencia los resultados de las muestras duplicadas discrepan por uno, dos, tres, y aún cuatro factores. Estas aberrancias pueden resultar de la técnica empleada, o pueden ser debidas a diferencias reales en el contenido del fitoplancton de las dos muestras.

Cantidad de zooplancton

Se hicieron mediciones de la cantidad de zooplancton por medio de arrastres con mangas planctónicas, aplicando equipos y técnicas comparables a las empleadas por la entidad Investigaciones Cooperativas de la Pesquería Oceánica de California (California Cooperative Oceanic Fishery Investigations). En cada estación se hizo un recorrido oblicuo con una manga planctónica de un metro (diámetro de la boca) fabricada de gasa de seda de tejido "grano de arena" de 30XXX en el cuerpo de la red, y de 56XXX en la sección posterior y en la bolsa del extremo. La manga fué descendida desde la superficie hasta una profundidad de 300 metros aproximadamente (con

450 metros de línea) a una velocidad de 50 metros por minuto, en tanto que la embarcación seguía su camino despaciosamente y recuperaba a una velocidad de 20 metros por minuto. En consecuencia, la duración de cada arrastre oblicuo fué de 32 minutos, en promedio. Un medidor de paso de agua "Atlas" fué instalado en la boca de la red para registrar el volumen de agua de mar filtrada por la manga. Estos medidores de paso de agua fueron calibrados antes y después del crucero. Los detalles cuantitativos de todos los arrastres planctónicos hechos con los barcos *Spencer F. Baird* y *Horizon*, durante la Expedición Eastropic, aparecen en las Tables 2 y 3, respectivamente.

Las muestras de zooplancton fueron conservadas en formalina diluída al 4%. Ya en tierra, las recolecciones fueron filtradas y los volúmenes "húmedos" totales del plancton obtenido en cada estación fueron medidos por coladura. El volumen de agua muestreada en cada arrastre se determinó mediante el sistema descrito por la entidad Investigaciones de la Pesquería del Pacífico Sur del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (1953) (South Pacific Fishery Investigations of the U. S. Fish and Wildlife Service), y el volumen de plancton fué luego convertido en términos de volumen de organismos, en centímetros cúbicos, recogidos de cada 1000 metros cúbicos de agua de mar filtrada por la red. Los valores regularizados correspondientes a cada estación se indican en las dos últimas columnas de las Tablas 2 y 3, primero con respecto a la muestra completa y, segundo, respecto de la muestra una vez que fueron removidos todos los organismos de un volumen mayor de 5 centímetros cúbicos.

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES *IN SITU* EN RELACION CON LAS CARACTERISTICAS OCEANOGRAFICAS

Observaciones de la superficie

Los valores de la clorofila "a" de las aguas superficiales, los de la producción primaria de estas mismas aguas, determinada *in situ*, y los volúmenes del zooplancton observados durante la expedición, aparecen en las Figuras 2 a 4; la Figura 1 muestra el sistema de corrientes y masas de agua, basado en un estudio preliminar de las observaciones hidrográficas y las mediciones de corrientes hechas durante el crucero.

En las aguas de la Corriente de California y la Corriente Ecuatorial del Norte (Estaciones 1-10), muy afuera de Baja California y de México Central, encontramos en general bajas concentraciones de clorofila "a" (alrededor de 0.1 mg/m^3), muy baja producción primaria de superficie (más o menos $0.40 \text{ mgC/m}^3/\text{día}$), y volúmenes pobres de zooplancton (generalmente menos de $50 \text{ cc}/1000 \text{ m}^3$).

En la región fronteriza norte de la Contracorriente Ecuatorial se hallaron más altos valores de clorofila, producción primaria y volúmenes del zooplancton; estos valores tienden a subir de oeste a este, hacia la costa

de América Central. Este fenómeno parece estar relacionado con la termoclina, que se eleva cerca de la superficie, como un cerro, a lo largo de esta frontera, y que disminuye de oeste a este. En la Estación 31-11 (Figura 2), por ejemplo, alrededor de los 115° de longitud oeste, el estrato de agua mezclada tiene un espesor de cerca de 30 metros, mientras que en la Estación 33, más o menos en los 90° de longitud oeste, solamente media 18 metros. En el extremo de la costa, el cerro de agua parece convertirse en una ancha "cúpula" frente a la América Central, siendo de nuevo la termoclina ligeramente más profunda cerca de tierra (e.g. en las Estaciones 35 y 39, el estrato de agua mezclada tenía de 25 a 30 metros de espesor). En la región de esta "cúpula" frente a la América Central, encontramos en aguas superficiales, valores relativamente altos de clorofila (de 0.2 a 0.3 mg/m³); de producción primaria (alrededor de 25 mgC/m³/día) y de volúmenes del zooplancton (200 cc/1000 m³ y más altos).

En la región fronteriza norte de la Corriente del Perú, frente a la parte septentrional de Sud América y en la vecindad de las Islas Galápagos (Estaciones 50 a 59), hallamos alta cantidad de fitoplancton (clorofila "a" hasta 2.0 mg/m³) y zooplancton (hasta 600 cc/1000 m³). La producción primaria de superficie, en las dos estaciones en que se midió, fué también alta, pero no tanto como frente a la América Central. Sin embargo, en la Estación 57 (Figura 2) la producción en la columna de agua, en su totalidad, excedió los valores obtenidos en la región de Centroamérica.

También se observaron niveles bastante altos de clorofila "a", producción primaria de fitoplancton y volúmenes del zooplancton en la Corriente Ecuatorial Sur (Estaciones 18 a 24) en la vecindad del ecuador, cerca de los 115° de longitud oeste. Los datos hidrográficos recogidos en este y otros cruceros indican la presencia de afloramiento a lo largo del ecuador (resultados sin publicar).

También se presentan altos niveles de clorofila y zooplancton en el área frente a la costa de México, desde el Golfo de Tehuantepec hasta las vecindades de Cabo Corrientes. Desgraciadamente la provisión de C¹⁴ se había terminado cuando la expedición llegó a esta área, de modo que no fué posible determinar la producción.

Observaciones en aguas subsuperficiales

En siete estaciones se efectuaron observaciones de la concentración de clorofila "a" y de la proporción de la producción primaria *in situ*, a diversas profundidades, hasta unos 100 ó 125 metros. Estas observaciones, junto con las temperaturas registradas y las concentraciones de salinidad y oxígeno, aparecen en las Figuras 5 a 11 inclusive, en función de profundidad.

Las Estaciones 33, 35, 37 y 39, situadas frente a la América Central (Figuras 7 a 10), son generalmente similares en lo que se refiere a la distribución de la clorofila y de la producción primaria, lo mismo que a sus

características físicas. Las Estaciones 24 y 33-11 (Figuras 5 y 6) situadas en aguas muy afuera en la Contracorriente y en la Corriente Ecuatorial Sur, son diferentes con respecto a sus propiedades biológicas y físicas.

El primer grupo de estaciones se caracteriza por una capa de agua mezclada bien definida y de poca profundidad, dentro de la cual se presenta la mejor parte de la producción primaria (90% o más, excepto en la Estación 35 en que la proporción es alrededor del 67%). Las gradientes en clorofila "a" son pequeñas en los 40 metros superiores, y un importante volumen de la clorofila en la columna de agua aparece debajo de la termoclina y la haloclina. El porcentaje máximo de producción primaria se presenta en la superficie o muy cerca de ella. Durante el tiempo en que se trabajó en estas estaciones, los días estuvieron muy nublados, lo que presumiblemente estorbó la inhibición de la luz en la superficie (ver Steeman-Nielsen 1951 y 1952).

También se observa en cada una de estas estaciones (Figuras 7 a 10 inclusive) un aumento de la producción primaria justamente sobre la termoclina y la haloclina; sobre esto solamente podemos hacer especulaciones. Parece improbable que la cantidad de luz fotosintéticamente activa pudiera ser mayor en capas entre 10 y 20 metros, que en profundidades más cercanas a la superficie, de manera que no parece posible que la luz sea la causa de este aumento. De modo similar, el aumento no parece estar relacionado con la cantidad de clorofila "a" en el agua, aún cuando debe advertirse que el método para la determinación de esta sustancia no hace distinción entre la clorofila "a" y la faeofitina "a". Si el aumento observado es verdadero, otros factores que no son la luz y la clorofila, parecerían ser los causantes. Desafortunadamente, carecemos de datos sobre elementos nutritivos en estas estaciones. Una información de esta naturaleza podría haber sido valiosa para explicar esta aparente anomalía.

Aunque los datos correspondientes a las Estaciones 31-11 y 24 (Figuras 5 y 6) no son tan completos ni continuados como los de la zona frente a la América Central, las pocas observaciones que se han hecho indican una situación de tipo diferente. En este caso, una proporción importante de la totalidad de la producción primaria (más o menos 50%) se efectúa debajo de la capa de agua mezclada; dicha producción es relativamente alta en profundidades de 70 metros. Solamente en la Estación 31-11 se puede notar que existe una buena correspondencia entre la concentración de clorofila y la tasa de producción. En la Estación 24 (Figura 6), que se encuentra en la región del afloramiento ecuatorial, puede apreciarse que hay muy poco grado de aumento de salinidad hasta una profundidad de 100 metros y que la termoclina no está muy fuertemente desarrollada.

En la Estación 57 (Figura 11), cerca del borde norte de la Corriente del Perú, la termoclina y la haloclina están mucho menos marcadas que en las estaciones frente a Centroamérica. En dicha estación, la clorofila se

mantiene alta hasta una profundidad de 70 metros, mientras que la producción primaria decae a una cantidad insignificante mucho más cerca de la superficie.

La región frente a la América Central se caracteriza también por un pronunciado *mínimum* de oxígeno en las capas superiores (Figuras 7 a 10). La disminución más rápida en la concentración de oxígeno se opera inmediatamente debajo de la capa mezclada. Existe la hipótesis de que el agua de pobre contenido de oxígeno se origina aquí, como un resultado de la necesidad que de éste tienen los organismos fitoplanctónicos debajo de la profundidad de compensación, a través de la respiración del fitoplancton y/o de la actividad de las bacterias, a lo que se suman los organismos muertos o al extinguirse. Del mismo modo, los datos recogidos en la Estación 57 (Figura 11) sugieren una explicación similar con respecto a la existencia de un *mínimo* de oxígeno al sur del ecuador, frente al Perú.

CORRELACION ENTRE LA PRODUCCION PRIMARIA Y LOS VOLUMENES DEL ZOOPLANCTON CON LA CLOROFILA DE AGUAS SUPERFICIALES

Si se consideran en conjunto los datos disponibles sobre producción primaria y clorofila "a", recogidos en aguas superficiales (Figura 12), parece que hubiera alguna correlación entre estas dos variables, pero con una dispersión bastante grande. Los datos revelan que, en promedio, la producción primaria baja se encuentra asociada a un punto bajo de clorofila "a", y que ésta es alta cuando la producción también lo es. Los puntos, en la mayoría de las estaciones, parecen localizarse a un lado y otro de una línea indefinida o vaga, con indicación de un aumento más rápido en la producción que en la clorofila "a". Sin embargo, las estaciones frente a la América Central, particularmente las números 33, 35 y 37, indican una producción relativamente más alta por unidad de clorofila que la que refleja el resto de los datos.

Edmondson (1955) al estudiar las poblaciones resultantes del enriquecimiento del agua de Woods Hole Harbor, cultivadas en tanques de concreto, encontró que la relación entre la producción (medida según la técnica del oxígeno en las botellas claras y oscuras) y la clorofila, podría mejorar si se toman en consideración las variaciones en la iluminación. A fin de examinar si existía tal relación en cuanto a nuestros datos, ya que no se habían hecho mediciones directas de la iluminación, obtuvimos el flujo promedio de radiación (directo más difuso) en un cielo sin nubes, mediante las curvas de Kimball (1928), por el mes de diciembre, y aplicamos la corrección del mismo Kimball (1928) con respecto al grado de sombra observado. La producción superficial *in situ* fué entonces calculada en términos del carbón obtenido por metro cúbico, por día, por unidad de iluminación, y la graficamos de nuevo en función de la concentración superficial de la clorofila en las mismas estaciones. La relación resultante fué

muy similar a la que muestra la Figura 12, con el mismo grado de dispersión, aproximadamente.

Si los datos obtenidos *in situ* en la Figura 12 se estudian tomando en cuenta la posición geográfica de las localidades de muestreo, vemos que se separan en 3 grupos que presentan diferentes grados de relación entre la producción primaria y la clorofila. Las estaciones mar afuera, aproximadamente al norte de los 7° N. de latitud (Estaciones 1, 6, 13, 32-10, 31-11 y 27), que están situadas en la Corriente Ecuatorial Norte y en la Contracorriente Ecuatorial, se encuentran dentro de un grupo, mientras que las estaciones costeras frente a la América Central (Estaciones 33, 35, 37 y 39), forman otro grupo. Un tercer grupo está integrado por las estaciones situadas en la Corriente del Perú, frente al Ecuador y a la costa peruana, y por una que se halla bastante al oeste de las Islas Galápagos sobre el ecuador, en la Corriente Ecuatorial Sur (Estaciones 25, 45, 57 y 51).

Estamos dudosos acerca del significado de estas relaciones. Podrían tener una explicación en el reciente trabajo de Rodhe (según lo que nos ha comunicado personalmente), quien encontró una relación entre la producción primaria y la clorofila en una sola estación en Lago Erken. Al agrupar sus observaciones diarias en períodos mensuales, éstas le revelaron, con una sola excepción, que existía una buena relación entre la producción y la clorofila en cualquier mes, pero que esta relación variaba de un mes a otro. El sugiere que las diferencias apreciadas en las relaciones entre la producción y la clorofila pueden ser el resultado de cambios en la composición de las especies de la población de fitoplancton. Aún cuando las variaciones observadas por Rhode son en el tiempo y no en el espacio, sería de esperar que se presentaran diferencias considerables en la composición de la población de fitoplancton en las diversas masas de agua del Pacífico Oriental Tropical. En tanto no tengamos datos para respaldar esta postulada diferencia en la composición del fitoplancton, debemos creer que alguna de la variabilidad observada en la relación que se nota entre la producción primaria y la clorofila "a", debe ser atribuída a esta diferencia.

La existencia de una relación general entre la clorofila y la producción primaria, con un más bien alto grado de variabilidad y alguna evidencia de diferencias en áreas ampliamente separadas, resulta sin duda alguna de la interacción de diversos factores. Los factores que pueden tener importancia en esa variabilidad son los siguientes: diferencias en la composición de las especies; diferencias en el grado de la fotosíntesis de cada especie, que dependen de la distribución espectral y de la energía de la radiación en la subsuperficie; condiciones nutritivas y, tal vez, diferencias en el grado de la fotosíntesis por unidad de clorofila, relacionadas con la posición de los diversos componentes de la población en sus curvas de crecimiento y con su historia en el pasado.

La elucidación de los efectos de los factores que acabamos de apuntar y de otros factores necesitará de estudios mucho más detallados. Sin em-

bargo, pareciera que, en forma muy general, la cantidad de clorofila por unidad de volumen de agua superficial proporciona una base para estimar, aunque deficientemente, el grado de fijación del carbón en la capa superficial del mar en la región tropical del Pacífico Oriental. Los bajos valores de clorofila, menos de unos 2 mg/m^3 , indican muy baja productividad (i.e. menos de unos $2 \text{ mgC/m}^3/\text{día}$). Sin embargo, a niveles más altos de clorofila, la variabilidad en los grados de fijación del carbón entre una masa de agua y otra es tan grande que el error en la estimación viene a ser muy amplio.

En general, hay bastante concordancia entre la distribución geográfica de la clorofila "a", la producción primaria y los volúmenes del zooplancton (Figuras 2, 3 y 4). La relación entre la clorofila de la superficie y los volúmenes del zooplancton está mejor ilustrada en la Figura 14. Se considera que la clorofila superficial proporciona una base útil para la estimación del volumen del zooplancton en el Pacífico Oriental Tropical.

ASIMILACION DE CARBON CATORCE EN MUESTRAS INCUBADAS A BORDO

Las muestras de aguas superficiales cuya producción fué medida *in vitro* bajo constante iluminación a la temperatura de la superficie del mar, no demostraron una relación clara entre la concentración de la clorofila y la producción primaria, por unidad de iluminación (Figura 13).

Ryther (1956b, Figura 2) ha encontrado en sus estudios con cultivos de fitoplancton marino, que el grado de la producción (medida por el método del oxígeno) por unidad de clorofila "a", a una intensidad invariable de luz, es casi constante en algunas especies. Los datos de la Expedición Eastropic no parecen apoyar las conclusiones de Ryther. Debemos admitir que los experimentos realizados a bordo fueron poco satisfactorios en cuanto a la intensidad de la luz a la que nuestras muestras fueron sometidas, ya que varió de un experimento a otro, a pesar de que esta intensidad se mantuvo constante durante cada experimento (ver página 159). A pesar de esto, los grados de intensidad empleados por nosotros se presume que estuvieron por debajo de los niveles que habrían causado saturación (ver Ryther 1956a, y Steeman-Nielsen, 1952), de modo que tendríamos que esperar, a base de los experimentos de Ryther, una positiva correlación entre la clorofila y la producción primaria por unidad de iluminación.

Tratando de encontrar una posible explicación de nuestros resultados en relación con los experimentos de Ryther, podemos observar que el radio de las concentraciones de clorofila y de la producción primaria, en sus cultivos, eran mucho mayores que el radio de las concentraciones de clorofila y de los grados de la fijación de carbón que encontramos en la Expedición Eastropic. En verdad, la escala de valores de Ryther ha excedido en mucho, aparentemente, a los encontrados normalmente en el mar, aún en latitudes nórdicas.

Los intentos para igualar la asimilación de carbón radioactivo de las muestras de aguas superficiales incubadas a bordo, con la observada en las muestras incubadas *in situ*, tomando en cuenta las variaciones en la iluminación solar, no han tenido buen éxito. Esto puede ser el resultado de la imposibilidad con que tropezamos para hacer estimaciones suficientemente precisas de la radiación en el área mediante mapas climáticos, y de nuestro conocimiento inadecuado del nivel de energía que causa la saturación de la fotosíntesis en las poblaciones naturales. De modo similar, la falta de mediciones de la luz submarina ha impedido un mayor análisis de los resultados de las medidas de la asimilación del C^{14} en la incubadora, realizadas con muestras tomadas debajo de la superficie del agua.

VARIACION EN EL TIEMPO EN LOS VOLUMENES DEL ZOOPLANCTON

La comparación entre los volúmenes del zooplancton estimados durante la Expedición Shellback en 1952 (Figura 15) y los de la Expedición Eastropic en 1955 (Figura 4) nos da alguna idea de la variabilidad que puede ocurrir en diferentes estaciones y años. Los volúmenes del zooplancton en el verano de 1952 fueron generalmente más bajos que en el otoño de 1955. Sin embargo, debe advertirse que ciertas áreas de muy altos y de muy bajos volúmenes aparecen en ambos años en las mismas localidades. Merecen citarse especialmente las áreas de la región de la Corriente del Perú y a lo largo del ecuador, con altos volúmenes de plancton, y frente a la América Central. La escasez de organismos en aguas a cierta distancia de Baja California se manifiesta en ambos años. En aguas cercanas a tierra, a lo largo de la costa mexicana al norte del Golfo de Tehuantepec, el zooplancton fue pobre en 1952 pero abundante en 1955.

COMPARACIONES CON OBSERVACIONES EN OTRAS REGIONES OCEANICAS

Steeman-Nielsen se refiere en un informe (1954) a la productividad de C^{14} en una serie de estaciones del *Galathea*, en el Pacífico, durante una travesía de Nueva Zelandia a California. Sus valores de producción en la columna de agua, por metro cuadrado de superficie, fueron calculados sobre la base de las determinaciones hechas en la incubadora de a bordo y de las mediciones de la luz a diferentes profundidades marinas. En las diversas estaciones a lo largo de la sección estudiada por él, situadas entre los 140° y 180° de longitud O. encontró que la proporción en la producción era entre 0.10 y 0.19 $gC/m^2/día$, excepto en la vecindad del ecuador, en donde se registró la cifra de 0.5 $gC/m^2/día$, y en una estación algo más al norte del ecuador, que él considera está "influida por las divergencias producidas por la Contracorriente", se anotó un valor de 0.26 $gC/m^2/día$. Nuestro registro de 0.51 $gC/m^2/día$, en la Estación 24 sobre el ecuador, concuerda bien con los resultados que anota Steeman-Nielsen en su estación cerca del ecuador.

Sin embargo, nuestra cifra de $0.012 \text{ gC/m}^2/\text{día}$, *in situ*, en la Estación 31-11, es mucho más baja que lo que indican los resultados del barco *Galathea* en la misma latitud, más hacia el oeste, siendo también muy baja la asimilación de C^{14} en las muestras *in vitro*. Este valor tan bajo resulta en cierto modo anómalo, y es preciso confirmarlo en una futura expedición antes de ser aceptado como representativo de la zona en que la Estación 31-11 fué situada.

Los datos de Steeman-Nielsen sobre una alta producción en el ecuador, con valores algo más bajos al norte y al sur, han sido confirmados por M. Oguri (comunicación personal), quien hizo determinaciones *in vitro* de la asimilación de C^{14} en muestras de aguas superficiales en varias estaciones de la región entre los 110° y 140° de longitud O. y entre los 5° N. y 5° S. de latitud, con el barco *H. M. Smith* en el otoño de 1955, al mismo tiempo que nosotros hacíamos estudios más al este. Oguri encontró que la asimilación de C^{14} en las muestras de agua tomadas de las estaciones sobre el ecuador es significativamente más alta que en las situadas en los 5° N. ó 5° S. de latitud.

La producción que encontramos en el área de la "cúpula" frente a la América Central ($0.414\text{-}0.779 \text{ gC/m}^2/\text{día}$), es generalmente más alta que cualquiera de las registradas por Steeman-Nielsen en el Pacífico, excepto en las aguas costeras de Nueva Zelandia y de San Francisco. Estas proporciones de la producción en el área de la América Central, y aún la de mayor nivel que hallamos en la Estación 57 cerca del borde norte de la Corriente del Perú ($1.02 \text{ gC/m}^2/\text{día}$), compiten favorablemente con las áreas más productivas visitadas por el barco *Galathea* en la parte sur de la Corriente de Benguela, a lo largo de la costa africana, en donde Steeman-Nielsen ha registrado tasas de producción entre 0.46 y $2.5 \text{ gC/m}^2/\text{día}$.

Los valores de la clorofila, los volúmenes del zooplancton, y la producción primaria de las aguas superficiales en la muy pobre área mar afuera de Baja California, indican que esta región se halla entre las áreas oceánicas menos feraces, siendo probablemente tan pobre como la región del Mar de Sargaso. Es interesante observar que esta área no está muy lejana de la región que se encuentra a lo largo de Baja California que se conoce como muy rica en producción, a juzgar por los volúmenes de zooplancton medidos en otras expediciones.

LITERATURE CITED — BIBLIOGRAFIA CITADA

Edmondson, W. T.

- 1955 Factors affecting productivity in fertilized salt water. Papers in Mar. Biol. and Ocean., Deep Sea Research, supp. to Volume 3, pp. 451-464.

Kimball, Herbert

- 1928 Amount of solar radiation that reaches the surface of the earth on the land and on the sea, and methods by which it is measured. Monthly Weather Review, Vol. 56, pp. 393-399.

Richards, F. A., with Thompson, T. G.

- 1952 The estimation and characterization of plankton populations by pigment analyses. II. A spectrophotometric method for the estimation of plankton pigments.
Jour. Mar. Res., Vol. XI, No. 2, pp. 156-172.

Ryther, John C.

- 1956a Photosynthesis in the ocean as a function of light intensity. Limnology and Oceanography, Vol. I, No. 1, pp. 61-70.
1956b The measurement of primary production. Limnology and Oceanography, Vol. 1, No. 2, pp. 72-84.

Steeman-Nielsen, E.

- 1951 The marine vegetation of the isefjord — a study on ecology and production.
Medd. Komm. Danmarks Havundersog, Serie plankton, Vol. V, No. 4, pp. 1-114.
1952 The use of radioactive carbon (C^{14}), for measuring organic production in the sea.
Jour. du Conseil, Vol. 18, No. 2, pp. 117-140.
1954 On organic production in the oceans.
Jour. du Conseil, Vol. 19, No. 3, pp. 309-328.

South Pacific Fishery Investigations, U. S. Fish and Wildlife Service

- 1953 Zooplankton volumes off the Pacific coast, 1952.
U. S. Fish and Wildlife Service, Spec. Sci. Rep., Fisheries, No. 100, 41 pp.

Van Dorn, William G.

- 1956 Large-volume water samplers.
Trans. Am. Geophysical Union, Vol. 37, No. 6, pp. 682-684.

